وزارة التربية والتعليم والتعليم الفني

MINISTRY OF EDUCATION AND TECHNICAL EDUCATION

E = mc²
E = mc²
aXₙ(1−Xₙ)
Xₙ₊₁ = aXₙ(1−Xₙ)
logₐ(xy) = logₐx + logₐy

الفيزياء

البكالوريا المصرية

الجزء الأول

الصف
11

SPRIX

الفيزياء

البكالوريا المصرية

الصف الثاني

Advised by
INTERNATIONAL
BACCALAUREATE®

The International Baccalaureate™

has reviewed the pedagogical and assessment approaches underpinning this textbook.

© 2026 Ministry of Education and Technical Education
All rights reserved.
Copyrights and accountability for the content of this textbook remain with the Ministry of Education and Technical Education.
No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system,
or transmitted in any form or by any means - electronic, mechanical, photocopying, recording,
or otherwise - without the prior written permission of the copyright holders.

Ministry of Education and Technical Education
New Administrative Capital
Cairo, Egypt

مقدمة

تجسيدًا لرؤية نظام البكالوريا المصرية والتزامها بإعداد متعلمين قادرين على مواكبة متطلبات القرن الحادي والعشرين، يأتي تطوير كتاب الفيزياء للصف الثاني الثانوي ليقدم للطلاب تجربةً تعليمية رصينة، ممتعة، ومحفزة فكريًّا. وقد صُمم هذا المنهج لترسيخ الفهم المفاهيمي العميق، وبناء الثقافة العلمية، مع تمكين المتعلمين من تطبيق المعارف والمهارات الفيزيائية في سياقات الحياة الواقعية.

تقوم فلسفة هذا الكتاب على التعلم القائم على الاستقصاء؛ حيث يبني الطلاب فهمهم ذاتيًّا عبر الملاحظة، والتساؤل، والبحث، والتفكير المستند إلى الأدلة. وينطلق التعلم من ظواهر حيوية، ومواقف حقيقية، وخبرات استكشافية تستثير الفضول، وتدفع المتعلمين إلى البحث عن تفسيرات علمية للعمليات والأنشطة الفيزيائية في محيطهم. وعبر هذا النهج، يُوجَّه الطلاب لاستكشاف الأنماط، وصياغة التفسيرات، وبناء الاستيعاب العلمي قبل الخوض في المفاهيم والمبادئ والقوانين والنماذج الرسمية.

يعكس تنظيم كل درس تسلسلًا متناغمًا ينطلق من الاستكشاف وصولًا إلى بناء المفهوم وتطبيقه؛ متبعًا في ذلك استراتيجية **(التهيئة – الشرح – حلل – حاول – تمرين)**؛ حيث يُقدَّم للطلاب أولًا سياقات وظواهر ونماذج مختارة بعناية، لربط التعلم الجديد بالمعارف السابقة والخبرات اليومية. وتُشكّل هذه المقدمات الجاذبة حافزًا للاستقصاء، يُحفّز المتعلمين على تحليل الملاحظات، وتفسير الأدلة، وتحديد الأنماط، وصياغة تفسيرات أولية. وتأسيسًا على هذه المرحلة الاستكشافية، يتفاعل الطلاب مع المفاهيم، والمبادئ، والقوانين، والنماذج الفيزيائية الجوهرية التي تفسر تلك الظواهر وتمنحهم إطارًا منظمًا لفهم العالم الطبيعي. وقد نُظّم المحتوى هادفًا إلى ترسيخ **الفهم المفاهيمي العميق عوضًا عن الحفظ التلقيني**، مما يُمكّن المتعلمين من إدراك العلاقات بين المفاهيم، وإقامة روابط وثيقة بين الأفكار، وتطبيق معارفهم بثقة في سياقات جديدة ومبتكرة. وعبر محطتي (جرِّب) و(تمرين)، تُتاح للطلاب فرص حيوية لممارسة ما اكتسبوه وتطبيقه، وصولًا إلى بناء استيعابٍ رصين ومترابط ومتكامل لعلم الكيمياء.

ويتيح هذا الكتاب **مساراتٍ رحبة للتجريب، وحل المشكلات، والاستقصاء المستقل**؛ حيث يُحفّز الطلاب على اختبار الأفكار، وجمع البيانات وتحليلها، وتقييم الأدلة، والتوصل إلى استنتاجات مدعومة بالأدلة. وعبر هذه الخبرات العملية، يكتسب المتعلمون ثقةً راسخة في توظيف التفكير العلمي، ليتحولوا إلى مشاركين فاعلين في بناء المعرفة، تجاوزًا لنمط التلقِّي السلبي للمعلومات.

يتكامل التقييم في عملية التعلم بوصفه أداة للتعلم والتحسين المستمر معًا. وتتيح الدروس محطات متنوعة للتقييم التكويني والختامي، تُمكن الطلاب من رصد تقدمهم، وتحديد مجالات نموهم المعرفي، وإظهار عمق فهمهم. وقد صُممت مهام التقييم بعناية لتُحاكي نمط الأسئلة الاختبارية، مع التركيز على تحفيز مهارات التفكير العليا، والتحليل، وتطبيق المعارف في سياقات جديدة وغير مألوفة.

أُولي اهتمام خاص لإبراز طبيعة العلم بوصفها ركيزةً أساسية للثقافة العلمية؛ حيث تُتاح للطلاب فرص لفهم كيفية توليد المعرفة العلمية، والتحقق من صحتها وتنقيحها، ونقلها داخل الأوساط العلمية. كما يشجع المنهج على تقدير إسهامات العلماء والمبتكرين الذين شكّلت اكتشافاتهم فهمنا للعالم الفيزيائي وأسهمت في تقدم الإنسانية.

يطوِّر الكتاب بصورة منهجية مهارات عمليات العلم، بدءًا من الملاحظة والقياس والتصنيف مرورًا بالاستدلال، والتنبؤ، والتجريب، وصولًا إلى تفسير البيانات والنمذجة والتواصل العلمي. وتتكامل هذه المهارات ضمن خبرات التعلم؛ لضمان ألّا يقتصر دور الطلاب على استيعاب المعرفة العلمية فحسب، بل يمتد إلى بناء الكفاءات اللازمة للتفكير والممارسة بأسلوب علمي.

وتناغمًا مع تطلعات التعليم المعاصر، يُرسِّخ المنهج أبعاد الوعي العالمي والانفتاح الدولي؛ عبر ربط مفاهيم الفيزياء بالممارسات العلمية العالمية، والابتكارات التقنية، فضلًا عن التحديات البيئية وأهداف التنمية المستدامة. كما يحفز الطلاب على استيعاب الطبيعة المترابطة للمعرفة العلمية، وإدراك الدور المحوري للفيزياء في معالجة القضايا المؤثرة في المجتمعات على المستويات المحلية، والوطنية، والعالمية.

علاوة على ذلك، يستهدف المنهج تنمية التفكير الناقد والإبداعي؛ عبر إشراك الطلاب في تحليل الأدلة، وتقييم التفسيرات البديلة، وابتكار حلول ريادية، وتطبيق المعرفة العلمية في مواجهة تحديات واقعية. كما يُحفِّز المتعلمون على مقاربة المشكلات بمنظور العلماء والفيزيائيين والمهندسين؛ مستندين إلى التفكير المنظومي وهندسة التصميم لاستقصاء الأسئلة وتطوير حلول عملية.

الدمج المتعمد بين مفاهيم الفيزياء وحياة الطلاب وخبراتهم إحدى السمات الجوهرية لهذا الكتاب؛ حيث تُطرح الأفكار العلمية عبر الفصول ضمن سياقات دلالية حيوية، مدعومةً بتطبيقات معاصرة مستمدة من الصناعة، والصحة، والتقنية، والطاقة، والاستدامة، والحياة اليومية. وتعمل هذه الروابط على ترسيخ أهمية الفيزياء في وجدان المتعلمين، بما يُمكِّنهم من تقدير دورها المحوري في فهم العالم من حولهم والارتقاء به.

ومن الأبعاد الجوهرية أيضًا التزام المنهج بتعزيز التعلم التأملي؛ إذ يُحفِّز الطلاب على الانخراط في التقييم الذاتي والتفكير ما وراء المعرفي، مما يُمكِّنهم من رصد مستويات فهمهم، وتقييم استراتيجياتهم الدراسية، وتحمّل مسئولية أكبر تجاه نموهم الأكاديمي. ومن خلال التأمل في محتوى تعلمهم وآلياته، يكتسب الطلاب عادات التعلم المستمر مدى الحياة، ليكونوا قادرين على التكيف مع مختلف التحديات والفرص المستجدة.

في نهاية المطاف، يهدف هذا الكتاب إلى بناء جيلٍ من المتعلمين المثقفين علميًّا، والمسئولين، والمبدعين؛ مزودين بالمعارف، والمهارات، والقيم، والاتجاهات الكفيلة بتحقيق نجاحهم في عالمٍ سريع التغير. ونأمل أن تُلهم هذه الرحلة التعليمية الطلاب لاستكشاف الفيزياء بشغف، والتفكير بمنهجية، والعمل بمسئولية؛ بما يضمن إسهامهم الفاعل في رقيِّ المجتمع، ورسم مستقبلٍ مستدامٍ للإنسانية.

كيف تستخدم هذا الكتاب

يتّبع كل درس نفس التسلسل: الملاحظة، التوقَّع (التنبؤ)، القِياس، التسمية.

١ **سؤال الدرس**

الفكرة الكبيرة المطلوب الإجابة عنها

٢ **ستتعلم أن**

أهداف واضحة لهذا الدرس

٣ **الظاهرة — توقّع (تنبأ) أولًا**

شاهدها، ثم اكتب توقعك

٤ **استكشف**

جرِّبها ولاحظ الأنماط

٥ **مثال محلول (لماذا؟)**

طريقة الحل الموضحة مع التعليل

٦ **جرِّب بنفسك**

طبِّق الفكرة بنفسك

٧ **تحقّق من فهمك**

اختبار ذاتي سريع

٨ **تطبيق سريع**

طبِّق الفكرة في سياق جديد

٩ **سؤال ربط**

اربط الأفكار عبر الدرس

١٠ **صندوق المعادلات**

مفتاح المعادلات في لمحة

١١ **طبيعة العلم**

تعرَّف كيف تتطور الأفكار العلمية

١٢ **بأسلوب الامتحان**

طبِّق ما تعلمته في سياق امتحاني

ما الذي يميز هذا الكتاب؟

- إنه لا يكتفي بسرد حقائق الفيزياء — بل يدرِّبك كفيزيائي.
- توقَّع قبل الشرح، ثم اختبر أفكارك في ضوء الأدلة.
- فهم لماذا تعمل كل طريقة، اكتشف المفاهيم الخاطئة، واربط الأفكار عبر الدرس.

كيف يسير التعلّم هنا؟

١. الملاحظة

يحدث أمر واقعي
ويكسر ما كنت تتوقعه.

٢. التوقَّع (التنبؤ)

سجِّل توقعك
قبل أن تُكمل القراءة.

٣. القيِاس

نفِّذ ذلك بيديك
واجمع البيانات.

٤. التسمِية

تعلَّم المصطلح (المفهوم)
العلمي بعد بناء الفكرة،
لا بأن تحفظه أولًا.

ابدأ بالظاهرة
دع الأدلة تبني التفسير (الشرح).

الأدوات

1. التقنيات التجريبية
2. التكنولوجيا
3. الرياضيات

الاستقصاء

1. الاستكشاف والتصميم
2. جمع البيانات ومعالجتها
3. الاستنتاج والتقييم

المحتوى

الفصل الأول - الميكانيكا

١–١ متجهات السرعة والسرعة النسبية ٢
١-٢ حركة المقذوفات الأفقية ٨
١-٣ حركة المقذوفات بزاوية ١٤
١-٤ عزم القوة ٢١
١-٥ اتزان القوى ٢٧
١-٦ القدرة والكفاءة ٣٣
١-٧ كمية التحرك والدفع ٤٠
١-٨ حفظ كمية الحركة ٤٦
١-٩ كمية التحرك والطاقة الميكانيكية ٥٣
١-١٠ الحركة الدائرية المنتظمة والقوة المركزية ٥٩
١-١١ الحركة الدائرية: الأفقية والرأسية ٦٥
١-١٢ قوانين كبلر والجاذبية الكونية ٧٢

الفصل الثانى - الحركة الاهتزازية والموجات

٢-١ الحركة التوافقية البسيطة ٨٠
٢-٢ البندول الزنبركي ٨٦
٢-٣ البندول البسيط ٩٣
٢-٤ الموجات الجيبية ٩٩
٢-٥ تداخل الموجات والموجات الموقوفة ١٠٧
٢-٦ انكسار الموجات ١١٤
٢-٧ تداخل موجات الصوت ١٢١
٢-٨ تأثير دوبلر ١٢٨
٢-٩ انكسار الضوء والانعكاس الكلي الداخلي ١٣٥
٢-١٠ العدسات والصور ١٤٢
٢-١١ تجربة الشق المزدوج ليونج ١٥١

الفصل الأول

الميكانيكا

(القوى والحركة)

أسئلة إرشادية؟

- كيف يمكن وصف أي حركة والتنبؤ بها؟
- بماذا تخبرنا القوى وكمية التحرك عن كيفية تغيّر الحركة؟
- لماذا تظل الطاقة الكلية لنظام معزول محفوظة (ثابتة)؟

الدرس ١-١ — متجهات السرعة والسرعة النسبية

؟ سؤال الدرس:

لماذا ترسو عّبارة موجَّهة مباشرة عبر النيل عند نقطة فى اتجاه مصب النيل بمسافة؟

لماذا يترك المطر المتساقط خطوطًا مائلة على نافذة حافلة متحركة؟

ستتعلم

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تشرح** كيف تتراكب سرعتان لعمل سرعة محصلة واحدة.

٢. **تحسب** المركبتين المتعامدتين لسرعة ما وتعيد تركيبهما.

٣. **تحدّد** سرعة جسم كما يراها مراقب متحرك

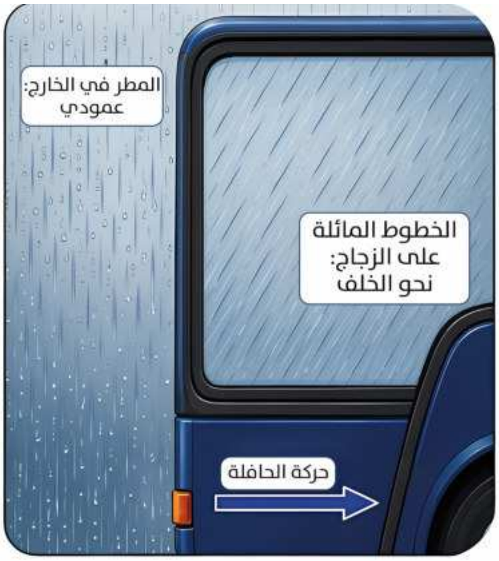
حقيقة أساسية:

المثلثات القائمة:

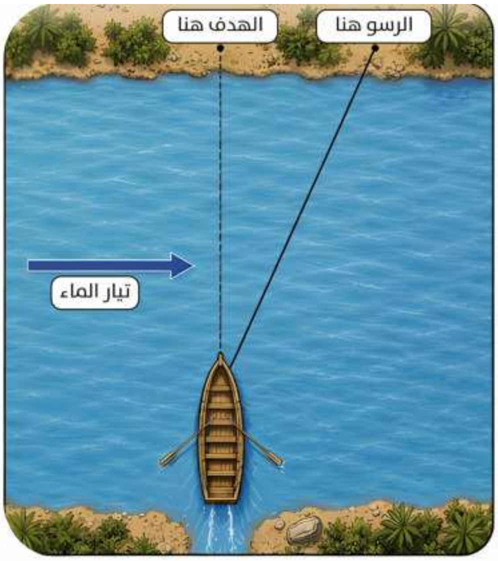
$c^2 = a^2 + b^2$

تمثل متجهات السرعة المتعامدة بيانيا مثلث قائم الزاوية

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر


المطر في الخارج: عمودي
الخطوط المائلة على الزجاج: نحو الخلف
حركة الحافلة

شكل (1.1.1)



شكل (2.1.1)

توجِّه عبّارة النيل مقدمتها مباشرة نحو نقطة الرسو على الضفة المقابلة. لا يتغيّر أداء المحرك (الموتور) أبدًا، ولا تنحرف المقدمة أبدا — ومع ذلك ترسو العبّارة عند نقطة أسفل مصب النهر بمسافة عن الهدف الذي توجّهت إليه. وفي صباح نفس اليوم، وأنت في الأتوبيس، يسقط المطر رأسيًّا تمامًا، لكن الخطوط التي يتركها على نافذتك تكون مائلة رغم ذلك.

مُلاحظتان كل يوم، ومبدأ واحد كامن وراءهما.

توقَّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) مع عدم تغيير (ثبات) اعدادات محرك العبّارة أبدًا. إذا أصبح تيار النهر أسرع، فهل سيستغرق العبور زمنًا أطول أم نفس الزمن أم زمنًا أقصر؟

(ب) من داخل الأتوبيس (الحافلة) المتحرك، هل الخطوط المائلة للمطر قادمة من أمام الأتوبيس أم من خلفه؟

استكشف — ارسم عملية العبور

ما ستفعله: تقيس أطوالًا وتحدد نمطًا.

الزمن: 12 دقيقة

ما تحتاجه (الأدوات): • ورقة مقاس A4 • مسطرة • قلم • قلم رصاص

قلم رصاص
قلم
مسطرة بها مجرى
ورقة A4

شكل (3.1.1)

⭐ ملاحظة القياس: تحرّكوا ببطء، واستخدموا إشارة مشتركة واحدة، ووثّقوا النمط العام أكثر من مرة بالتجربة (المحاولة) الواحدة.

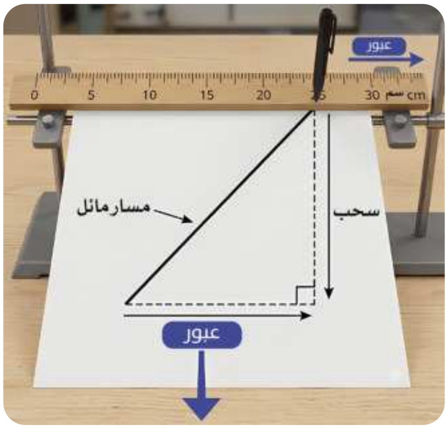
الخطوات:

١ يُمسك الزميل (أ) الورقة مسطّحة تحت المسطرة. عند الإشارة المتفق عليها، يسحب (أ) الورقة في خط مستقيم نحو صدره – بزاوية قائمة على المسطرة – بسرعة بطيئة ومنتظمة.

٢ في التوقيت نفسه، يحرِّك الزميل (ب) القلم على طول المسطرة بسرعة بطيئة ومنتظمة، ويقوم بالرسم طوال الوقت.

٣ توقفا معًا. قيسا المسافة التي تحركها القلم على طول المسطرة (مسافة **العبور**) والمسافة التي سُحبت بها الورقة (مسافة **السحب**). ثم قيسا طول المسار المائل المتروك على الورقة.

٤ كررا التجربة مرتين أخريين: مرة بسحب الورقة أسرع، ومرة بتحريك القلم أسرع.



شكل (4.1.1)

المحاولة	العبور (a) (cm)	السحب (b) (cm)	المسار المائل المقاس (c) (cm)	$\sqrt{(\text{السحب})^2 + (\text{العبور})^2}$ (cm)
١				
٢ (سحب الورقة أسرع)				
٣ (تحريك القلم أسرع)				

حلّل ما جمعته:

(أ) قارن بين العمودين الأخيرين، محاولة بمحاولة. ما النمط الذي توضحه الأرقام؟

(ب) يتحرك القلم على طول المسطرة فقط، بينما تُسحب الورقة في خط مستقيم لأسفل. كيف تتراكب هاتان الحركتين لتنتجا المسار المائل؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، تحرّك قلم الحبر على طول المسطرة فقط، ومع ذلك جاء مساره على الورقة مائلًا. ودائمًا ما يتطابق طول المسار المائل المقاس مع القيمة $\sqrt{(\text{السحب})^2 + (\text{العبور})^2}$ لا مجرد المجموع البسيط (المجموع الجبرى) لمسافتَي العبور والسحب.

ولعلك توقعت أن تتراكب الحركتان بالجمع المباشر لمسافتَي العبور والسحب، لكن تُظهر نتائجك الخاصة بالتجربة خلاف ذلك. والنموذج التالي يفسّر هذه الملاحظات.

السرعة كمية متجهة

تصف كلمة السرعة (velocity) مقدار سرعة الجسم والاتجاه الذى يتحرك فيه معًا - فهي كمية متجهة تُمثَّل بسهم.

وأحيانًا يكون لجسم واحد مركبتا سرعة: كقارب يدفعه محركه بينما يحمله تيار النهر في الوقت نفسه. عندئذٍ يتراكب السهمان من الرأس إلى الذيل ليكوّنا سرعة **محصلة واحدة** $\vec{v}$:

$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$$

وهذا هو جمع المتجهات (الجمع الاتجاهي)، وهي عملية هندسية لا حسابية. يجب جمع متجهات السرعة هندسيًّا لإيجاد المحصلة؛ ولا يصح الجمع الجبري البسيط للمقادير إلا عندما تكون المتجهات على استقامة واحدة.

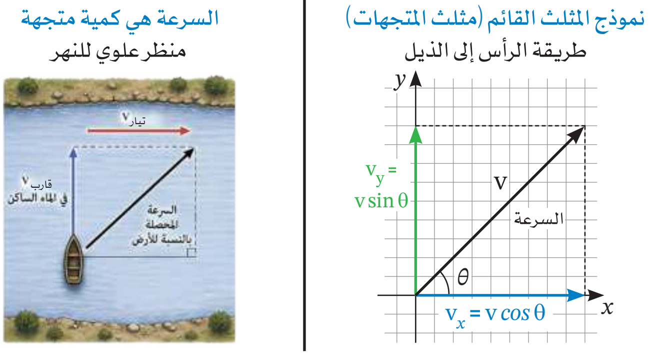
تحليل السرعة إلى المركبتين:

يمكن تحليل أي سرعة إلى مركبتين متعامدتين على أحد المحورين $v_x = v \cos \theta$

بينما على المحور الآخر $v_y = v \sin \theta$

مركبة العبور وحدها تحدد زمن العبور، بينما تحدد المركبة الطولية مقدار الانحراف مع مجرى النهر.

تعامل مع كل محور على حدة، ثم أعد التركيب باستخدام $v = \sqrt{(v_x)^2 + (v_y)^2}$



شكل (5.1.1)

نقطة

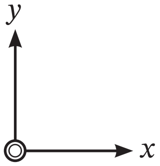
لتكن v_1 [م/ث] سرعة قارب في مياه ساكنة، وv_2 [م/ث] سرعة التيار؛ وتكون سرعة القارب بالنسبة للضفة هي $v = v_1 + v_2$، حيث يتم دمج المتجهات هندسياً وليس مجرد جمع مقاديرها. تُسمى السرعة v "**السرعة المحصلة**" لـ v_1 وv_2، وتُعرف عملية إيجادها بـ"**جمع السرعات**". وفي المقابل، يمكن تحليل v إلى v_1 وv_2، وتُسمى هذه العملية "**تحليل السرعة إلى مركبات**".

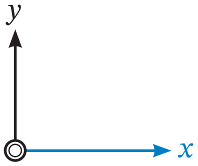
يتم تحليل v إلى مركبتين متعامدتين في اتجاهي **المحورين** x وy. إذا كانت v هي المقدار، وθ هي الزاوية بين v ومحور x، فإن: $v_x = v \cos \theta$، و$v_y = v \sin \theta$، و$v = \sqrt{(v_x^2 + v_y^2)}$. وتُعطى إشارة موجبة أو سالبة لمقدار كل مركبة للدلالة على اتجاهها على طول محور الإحداثيات.

لتكن v_A سرعة الجسم A، وv_B سرعة الجسم B. وتكون سرعة B كما يراها A - أي السرعة النسبية لـB بالنسبة لـA - هي $v_{AB} = v_B - v_A$ (أي سرعة الجسم المرصود مطروحاً منها سرعة المراقب).

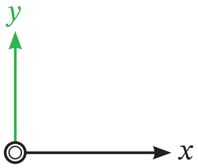
مصطلح:

السرعة المحصلة: متجه السرعة الواحد الذي له المسار نفسه لمتجهي سرعة مُركَّبين معًا.





المركبة الأفقية (x)

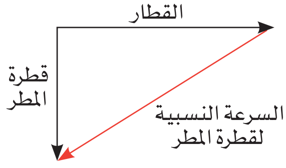


المركبة الرأسية (y)

صندوق المعادلات:

مركبتا السرعة	$v_x = v\cos\theta$ $v_y = v\sin\theta$	مقدار السرعة المحصلة	$v = \sqrt{(v_x)^2 + (v_y)^2}$

ماذا يرى المراقب المتحرك؟


القطار
قطرة المطر
السرعة النسبية لقطرة المطر
شكل (7.1.1)

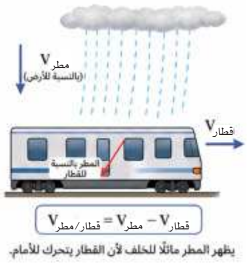
الآن اعتبر أن مراقبًا على متن جسم متحرك. فكما تُرى الأمور من القطار A، تختلف السرعة المقاسة بمقدار سرعة المراقب. والسرعة النسبية لـ B بالنسبة إلى A هي سرعة B مطروحًا منها سرعة A، $\vec{v}_{AB} = \vec{v}_B - \vec{v}_A$ أي سرعة الجسم المُراقَب مطروحًا منها سرعة المراقِب. ويُرسم كلا السهمين من نقطة أصل مشتركة. فالمطر في إطار الأرض يسقط رأسيًّا تمامًا، لكن بطرح السرعة الخاصة بالقطار المتحرك من سرعة سقوط المطر، يميل سهم الفرق إلى الخلف.

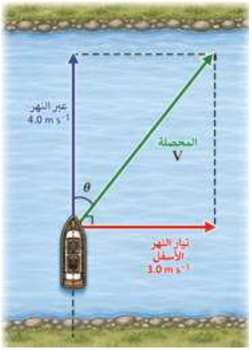
صندوق المعادلات:

السرعة النسبية لـ B بالنسبة إلى A	$\vec{v}_{AB} = \vec{v}_B - \vec{v}_A$

مثال محلول:

الموقف:	قارب سرعته في الماء الساكن $4.0\ m\ s^{-1}$، بحيث يتحرك في نهر مستقيم سرعة تياره $3.0\ m\ s^{-1}$. حيث تتجه مقدمة القارب بشكل عمودي على ضفة النهر. أوجد سرعة القارب بالنسبة إلى ضفة النهر.
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** سرعة القارب = $4.0\ m\ s^{-1}$ وسرعة تيار النهر = $3.0\ m\ s^{-1}$ (عمودية عليها). **المطلوب:** سرعة القارب بالنسبة إلى ضفة النهر.
التمثيل:	ارسم مثلث متجهات قائم الزاوية، ضلعاه القائمان سرعة القارب ($4.0\ m\ s^{-1}$) وسرعة تيار النهر ($3.0\ m\ s^{-1}$) ويمثّل وتره سرعة القارب المحصلة.
الاستراتيجية:	حلّل السرعة إلى اتجاهين متعامدين على المحورين x وy، واحسب مجموع أو فرق كل مركبة باستخدام $v = \sqrt{(v_x)^2 + (v_y)2}$
الحل الموضح:	على طول ضفة النهر: $v_x = 3.0\ m\ s^{-1}$ عبر النهر: $v_y = 4.0\ m\ s^{-1}$ $v = \sqrt{3.0^2 + 4.0^2} = \sqrt{25} = 5\ m\ s^{-1}$ إذن، سرعة القارب بالنسبة إلى ضفة النهر هي $5.0\ m\ s^{-1}$
منطقة الحل:	الناتج $5.0\ m\ s^{-1}$ أكبر من المركبة المفردة الأكبر ($4.0\ m\ s^{-1}$)، لكنه أصغر من المجموع الجبري البسيط ($7.0\ m\ s^{-1}$)، وهذا متوقَّع لأن مركبتَي السرعة متعامدتان. كما تشكّل الأرقام 3 - 4 - 5 المثلث القائم الزاوية المعروف.
فسِّرها بنفسك:	لماذا تكون السرعة المحصلة ($5.0\ m\ s^{-1}$) وليست ($7.0\ m\ s^{-1}$)؟


$V_{\text{مطر}}$ (بالنسبة للأرض)
$V_{\text{قطار}}$
المطر بالنسبة للقطار
$V_{\text{قطار/مطر}} = V_{\text{مطر}} - V_{\text{قطار}}$
يظهر المطر مائلًا للخلف لأن القطار يتحرك للأمام.
شكل (6.1.1)


عبر النهر
4.0 m s⁻¹
المحصلة
V
θ
تيار النهر الأسفل
3.0 m s⁻¹
شكل (8.1.1)

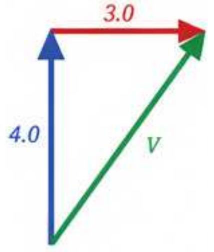
تطبيق سريع:

تتحرك طائرة بسرعة ثابتة مقدارها $60\ m\ s^{-1}$ بزاوية 30° على الأفقي. أوجد الارتفاع الذي تكتسبه خلال $5.0\ s$

نظرية فيثاغورث:

عندما يكون متجهان عموديين فإن:

$$v = \sqrt{(v_1)^2 + (v_2)^2}$$



حقيقة أساسية:

مثلث 3–4–5:

الضلعان القائمان 4 (عبور) و3 (طول) يُعطيان وترًا مقداره 5.

حاول بنفسك: يبدو المطر المتساقط رأسيًا لراكب في قطار مترو يعبر جزءًا مكشوفًا بسرعة $5.0\ \mathrm{m\ s^{-1}}$ وكأنه يسقط بزاوية 30° عن الرأسي. احسب سرعة قطرات المطر.

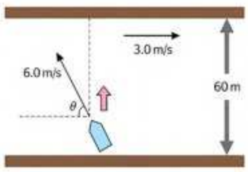
حاول:

(أ) قارب سرعته في الماء الساكن $6.0\ \mathrm{m\ s^{-1}}$، بحيث يتحرك في نهر مستقيم سرعة تياره $3.0\ \mathrm{m\ s^{-1}}$، حيث تتجه مقدمة القارب بشكل عمودي على ضفة النهر:

(i) أوجد الزاوية θ التي تصنعها المقدمة مع ضفة النهر.

(ii) إذا كان عرض النهر $60\ \mathrm{m}$، أوجد الزمن اللازم للعبور.

(ب) يركب شخص دراجة متجهًا غربًا بسرعة $5.0\ \mathrm{m\ s^{-1}}$، فشعر برياح شمالية سرعتها $5.0\ \mathrm{m\ s^{-1}}$. حدد اتجاه الرياح وسرعتها بالنسبة إلى الأرض.



شكل (9.1.1)

في سياق جديد — الهبوط عبر الرياح

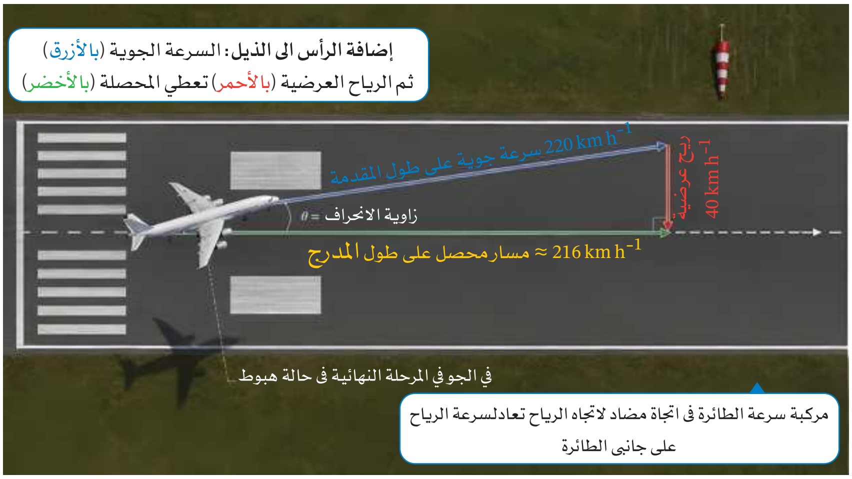
في ظهيرة يوم عاصف بمطار برج العرب، تهبّ الرياح عبر المدرج بينما يستعد الطيار للهبوط. لو كانت الطائرة موجهة بشكل مستقيم في اتجاه المدرج، لدفعتها الرياح الجانبية بعيدًا عن خط الوسط – وهي المشكلة التي واجهتها العبارة في سياق آخر. لذا، يوجه الطيار الطائرة قليلاً في اتجاه الرياح. وتعطي سرعة الطائرة في الهواء، من مقدمة الطائرة إلى مؤخرتها، مضافًا إليها سرعة الرياح، نتيجةً موجهةً مباشرةً على طول المدرج. وبسرعة اقتراب تبلغ $220\ \mathrm{km\ h^{-1}}$ ورياح جانبية تبلغ $40\ \mathrm{km\ h^{-1}}$، تكون (زاوية الانحراف) حوالى 10°.

نصيحة امتحانية:

السرعة كمية متجهة، تشمل المقدار والاتجاه. لا تكتفِ بكتابة رقم فقط حين يُطلب منك تحديد الاتجاه.

كتيّب البيانات:

التحليل، والجمع، وإعادة التركيب


220 km h⁻¹ سرعة جوية على طول المقدمة
زاوية الانحراف = θ
ريح عرضية 40 km h⁻¹
مسار محصل على طول المدرج 216 km h⁻¹ ≈
في الجو في المرحلة النهائية فى حالة هبوط

إضافة الرأس الى الذيل: السرعة الجوية (بالأزرق) ثم الرياح العرضية (بالأحمر) تعطي المحصلة (بالأخضر)

مركبة سرعة الطائرة فى اتجاة مضاد لاتجاه الرياح تعادلسرعة الرياح على جانبى الطائرة

شكل (10.1.1)

دورك الآن: فسِّر لماذا يجب أن يوجّه الطيار مقدمة الطائرة بعيدًا عن اتجاه المدرج رغم أن الطائرة يجب أن تسير بالضبط على طول المدرج.

طبيعة العلم: الملاحظات — السفينة التي أخفت حركتها

في عام ١٦٣٢، تخيّل جاليليو مقصورة أسفل سطح سفينة تُبحر بهدوء: ماء يتساقط، وأسماك في وعاء، وفراشات تحوم. فلا توجد أي ملاحظة داخل المقصورة تكشف ما إذا كانت السفينة ساكنة أم تتحرك بسرعة منتظمة. فما يقيسه المراقب يعتمد على حركة المراقب نفسه — هو نفس الدرس المستفاد من المطر المتساقط على نافذة الأتوبيس (الحافلة). ولا تكون السرعة ذات معنى إلا عندما يتم تحديد الإطار المرجعي

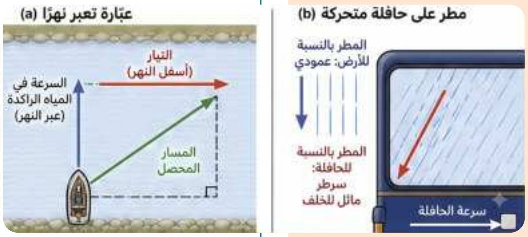
دورك الآن: اقترح كيف يمكن لمراقبَين دقيقين أن يسجّلا سرعتين مختلفتين لنفس قطرة المطر دون أن يكون أيّ منهما مخطئًا.

سؤال الدرس، وإجابته:

لماذا ترسو عبّارة موجَّهة مباشرة عبر النيل عند نقطة في اتجاه مصبها بمسافة؟

لماذا يترك المطر المتساقط خطوطًا مائلة على نافذة حافلة متحركة؟

سرعة العبّارة بالنسبة إلى الأرض هي المحصلة لكلا من سرعتها في الماء الساكن وسرعة تيار النهر، من مقدمة العبارة إلى مؤخرتها. لذا يميل مسارها باتجاه مجرى النهر رغم أن مقدمتها لا تنحرف أبدًا. أما المطر كما يراه راكب الأتوبيس (الحافلة)، فهو سرعة المطر بالنسبة إلى الأرض مطروحًا منها سرعة الأتوبيس - ولذلك فإن المطر الذي يكون عموديًا (رأسيًّا) في الإطار المرجعي للأرض يبدو مائلًا للمراقب من داخل الحافلة.

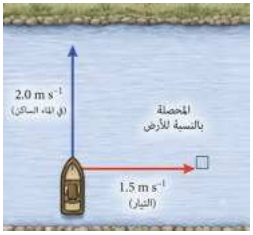

عبّارة تعبر نهرًا (a)
التيار (أسفل النهر)
السرعة في المياه الراكدة (عبر النهر)
المسار المحصل
مطر على حافلة متحركة (b)
المطر بالنسبة للأرض: عمودي
المطر بالنسبة للحافلة: سرطر مائل للخلف
سرعة الحافلة

شكل (11.1.1)

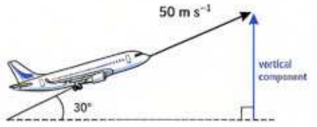
تمرين:

(أ) يتحرك قارب سرعته $2.0\ m\ s^{-1}$ في الماء الساكن في نهر مستقيم سرعة تياره $1.5\ m\ s^{-1}$، ومقدمته متجهة بشكل عمودي على ضفة النهر. أوجد سرعة القارب بالنسبة إلى ضفة النهر.

شكل (12.1.1)


2.0 m s⁻¹
(في الماء الساكن)
المحصلة
بالنسبة للأرض
1.5 m s⁻¹
(التيار)

(ب) تصعد طائرة بسرعة ثابتة مقدارها $50\ m\ s^{-1}$ بزاوية $30°$ الأفقي. أوجد الارتفاع الذي تكتسبه الطائرة خلال $10\ s$.


50 m s⁻¹
vertical component
30°

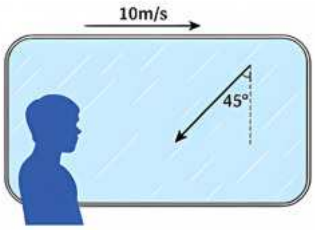
شكل (13.1.1)

(جـ) بالنسبة لمراقب ينظر من نافذة القطار A، الذي يتحرك على مسار أفقي بسرعة $10\ m\ s^{-1}$ يبدو المطر المتساقط رأسيًا وكأنه يسقط بزاوية $45°$ الرأسي.

(i) أوجد سرعة قطرات المطر.

(ii) بالنسبة لمراقب ينظر من نافذة القطار B الذي يمر بجانب القطار A، يبدو المطر ساقطًا بزاوية $60°$ الرأسي.

أوجد سرعة القطار B.



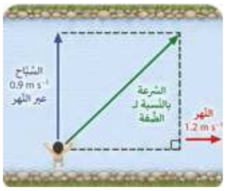
شكل (14.1.1)

(د) تتحرك السيارة A شرقًا بسرعة $20\ m\ s^{-1}$، وتتحرك السيارة B شمالًا بسرعة $20\ m\ s^{-1}$.

أوجد اتجاه ومقدار السرعة النسبية للسيارة B بالنسبة إلى السيارة A.

سؤال بأسلوب الامتحان:

يجري نهر بسرعة $1.2\ m\ s^{-1}$ موازية لضفتيه. بينما يتّجه سبّاح سرعته في الماء الساكن $0.9\ m\ s^{-1}$ مباشرة عبر النهر. أوجد مقدار سرعة السبّاح بالنسبة إلى الضفة.


السّبّاح
0.9 m s⁻¹
عبر النّهر
السّرعة
بالنّسبة لـ
الضّفة
النّهر
1.2 m s⁻¹

شكل (15.1.1)

١-٢ — حركة المقذوفات الأفقية

؟ سؤال الدرس:

عندما تُقذف عملة معدنية أفقيًّا من حافة طاولة بينما تسقط عملة أخرى رأسيا بجانبها في نفس اللحظة، أيهما تصل الأرض أولًا — وما الذي يحدد النتيجة؟

ستتعلم أن:

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تشرح** لماذا تحدث الحركتان الأفقية والرأسية للمقذوف بشكل مستقل.

٢. **تحسب** زمن الطيران ومدى مقذوف أُطلق أفقيًّا.

٣. **تحدد** سرعة المقذوف في أي لحظة بإعادة تركيب مركباته.

حقيقة أساسية

$v = v_0 + at$

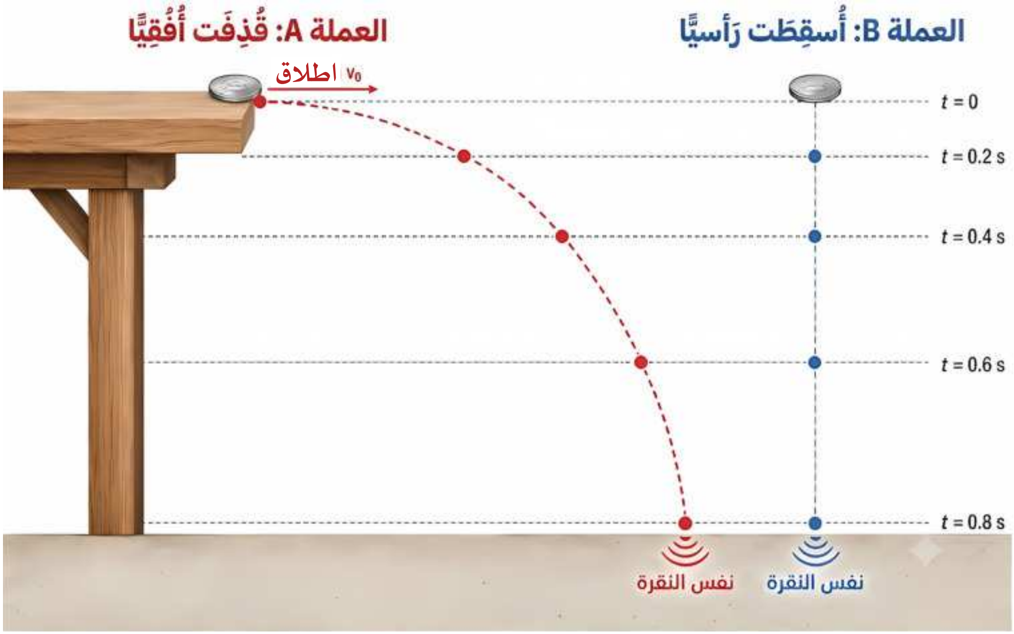
$d = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$

السقوط الحر:

$v_0 = 0$

$a = g = 9.8\,\mathrm{m\,s^{-2}}$

الظاهرة — توقّع قبل أن تستمر



شكل (1.2.1)

ضع عملتين معدنيتين عند حافة طاولة تمامًا. ادفع إحدى العملتين أفقيًا لتخرج من فوق الطاولة، وفي اللحظة نفسها، دع العملة الأخرى لتسقط بشكل رأسي من فوق الحافة مباشرة. تهبط العملة المقذوفة على مسافة بعيدة، بينما تهبط الأخرى أسفل الحافة تقريبًا.

توقّع قبل أن تكمل — اكتب توقعك:

(أ) أي العملتين تصل إلى الأرض أولًا – تلك (التي يتم قذفها أفقيًا)، أم التي تركت تسقط رأسيًا، أم لا تصل أي واحدة منهما؟

(ب) إذا قُذفت العملة الأولى بقوة ضعف السابقة، هل تبقى في الهواء لزمن أطول، أم أقصر، أم نفس الزمن؟

استكشف — قارن حركة عملتين

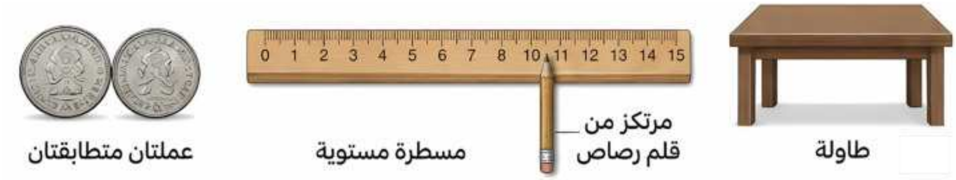
ما ستفعله: تُطلق أجسامًا المألوفة في حياتنا اليومية، وتقيس زمن حركتها، وتبحث عن نمط.

الزمن: 10 دقائق

ما تحتاجه (الأدوات):

- عملتان متماثلتان
- مسطرة مسطحة
- قلم رصاص
- طاولة

الخطوات:


طاولة
مرتكز من
قلم رصاص
مسطرة مستوية
عملتان متطابقتان
0 1 2 3 4 5 6 7 8 10 11 12 13 14 15

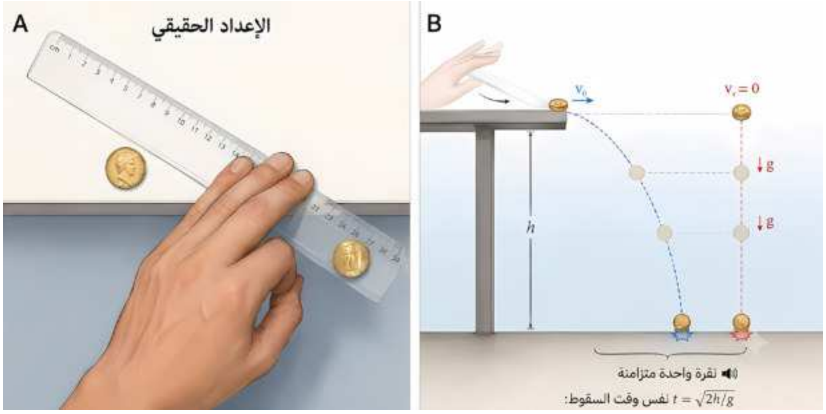
شكل (2.2.1)

١ ضع مسطرة بلاستيكية مسطحة على طاولة، بحيث يبرز أحد طرفيها خارج الحافة. أمسك المسطرة بإحكام بالقرب من مركزها. ضع عملة على الطاولة بجانب المسطرة وعملة ثانية على الطرف البارز.

٢ انقر الطرف البارز بشكل حاد. تُطلق المسطرة العملة الأولى أفقيًّا بينما تنسحب من أسفل العملة الثانية، فتسمح لها بالسقوط رأسيًّا. تبدأ العملتان حركتهما في نفس اللحظة تقريبًا.

٣ استمع: هل تسمع ارتطامًا واحدًا بالأرض أم اثنين؟ سجّل ما تسمعه.

٤ كرر التجربة خمس مرات، من نقرة خفيفة إلى أقوى نقرة ممكنة. سجّل كل محاولة.


A
الإعداد الحقيقي
B
v_0
$v_x = 0$
g
g
h
نقرة واحدة متزامنة
$t = \sqrt{2h/g}$ نفس وقت السقوط:

شكل (3.2.1)

المحاولة	قوة النقر (خفيفة ← قوية)	ارتطام واحد أم اثنان؟
١		
٢		
٣		
٤		
٥		

حلّل ما جمعته:

(أ) هل انقسم صوت الارتطام إلى نقرتين مع زيادة قوة النقر؟ ما النمط الذي يُظهره العمود؟

(ب) تقطع العملة المقذوفة مسارًا منحنيًا أطول بكثير، لكن الارتطامين يبقيان متزامنين. لماذا لا يؤدي المسار الأطول إلى زيادة الزمن اللازم للوصول إلى الأرض؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

حقيقة أساسية

تُسمع نقرتان متقاربتان أقل من نحو 20 مللي ثانية وكأنهما صوت واحد. كرر التجربة في غرفة هادئة.

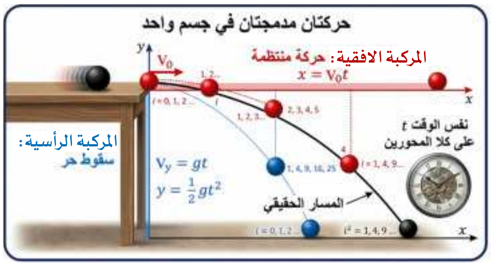
من الملاحظة إلى النموذج

في نشاط الاستكشاف، ارتطمت العملتان بالأرض في نفس الوقت تقريبًا، حتى عندما أُعطيت العملة المقذوفة أفقيًّا سرعات ابتدائية مختلفة.

وأدت زيادة سرعتها الأفقية إلى زيادة المسافة الأفقية المقطوعة لكنها لم تغيّر زمن سقوطها.

ولعلك توقعت أن العملة الأسرع ستهبط لاحقًا، لكن الملاحظات لم تؤيد هذا التوقع.

والنموذج التالي يفسر هذه الأدلة.



شكل (4.2.1)

حركتان تتجمعان في جسم واحد

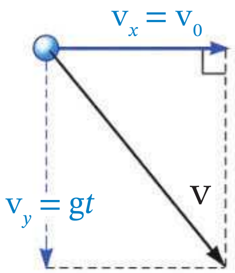
الجسم المقذوف أفقيًّا يأخذ مسار قطع مكافئًا وله حركتان مستقلتان. أفقيًّا، لا يدفعه أو يجذبه شيء على طول الحركة (بإهمال مقاومة الهواء)، فيحافظ الجسم على **سرعة ثابتة**:

$$x = v_0 t$$

ورأسيًا، تجذبه الجاذبية تمامًا كما تجذب أي جسم يسقط، فيكون الجسم في **سقوط حر**:

$$v = gt \ , \ y = \frac{1}{2}gt^2$$

وتكون الحركتان الأفقية والرأسية (مركبتا الحركة) **مستقلتين** — ولا تشتركان إلا في نفس الزمن t. فالجاذبية تؤثر فقط في الحركة الرأسية، بينما تحدد السرعة الأفقية الابتدائية وحدها المسافة الأفقية المقطوعة.



speed: $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$

شكل (5.2.1)

القطع المكافئ، وما الذي يحدد الزمن

ينتج عن تراكب مركبتي الحركة مسار على شكل قطع مكافئ. ومع ذلك، يمكن تحليل كل جزء من الحركة على حدة.

تخضع الحركة الرأسية للعلاقة $y = \frac{1}{2}gt^2$

حيث y هي المركبة الرأسية لإزاحة الجسم، ولذلك يُعطى زمن الطيران t بالعلاقة: $t = \sqrt{\frac{2y}{g}}$

وتخضع الحركة الأفقية للعلاقة $x = v_0 t$

حيث x هي المركبة الأفقية لإزاحة الجسم. تُحسب سرعة الجسم المقذوف أفقياً من خلال تراكب مركبتي السرعة الأفقية والرأسية.

نقطة

! تُعرف حركة الجسم المقذوف أفقياً باسم «حركة المقذوف الأفقي». وتُحلّ هذه الحركة إلى مركبتين: أفقية ورأسية، وتُعامل بوصفها حركتين خطيتين مستقلتين تشتركان فقط في الزمن نفسه (t).

! **المركبتان هما:**

المركبة الأفقية: يحافظ الجسم على سرعة ثابتة مقدارها v_0 [م/ث]، لذا فإن المركبة الأفقية للإزاحة x [م] تُعطى بالعلاقة: $x = v_0 t$.

المركبة الرأسية: يخضع الجسم لحالة سقوط حر. فإذا رمزنا لتسارع الجاذبية الأرضية بالرمز g [م/ث^2]، تكون المركبة الرأسية للسرعة $v = gt$، وتكون المركبة الرأسية للإزاحة y [م] هي: $y = \frac{1}{2}gt^2$.

مصطلح

المقذوف: جسم في حالة طيران تخضع حركته بعد إطلاقه لتأثير قوة الجاذبية وحدها (بإهمال مقاومة الهواء).

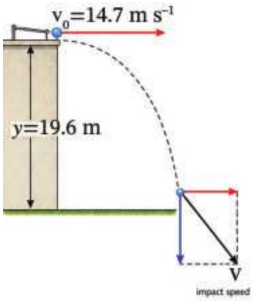
صندوق المعادلات:

الحركة الأفقية (حركة منتظمة)	$d = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$ عندما تكون a = 0 فإن $x = v_0 t$
الحركة الرأسية (سقوط حر من السكون)	$d = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$ عندما تكون u = 0 فإن $y = \frac{1}{2}gt^2$ ، $v = g\,t$

الارتفاع يحدد الزمن

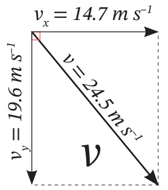
يعتمد الزمن من العلاقة $t = \sqrt{\frac{2y}{g}}$ على الارتفاع الرأسي (y) وعجلة الجاذبية (g) فقط . ولا تعتمد على السرعة الأفقية الابتدائية لأنها لا تؤثر في زمن الطيران. بينما زيادة سرعة الإطلاق (السرعة الأفقية الابتدائية) يؤدي إلى زيادة المسافة الأفقية المقطوعة، لكنها لا تغيّر الزمن اللازم لوصول المقذوف إلى الأرض.

فمثلًا، مضاعفة سرعة الإطلاق الأفقية تضاعف المدى الأفقي بينما يبقى زمن الطيران دون تغيير.



شكل (6.2.1)

مثال محلول:

الموقف:	قُذف جسم أفقيًا بسرعة 14.7 m/s من ارتفاع 19.6 m فوق الأرض. بافتراض أن عجلة الجاذبية الأرضية تساوي $9.8\ m/s^2$، أوجد ما يلي: (أ) الزمن اللازم بالثانية ليصل الجسم إلى الأرض. (ب) المدى الأفقي للجسم بالمتر. (جـ) سرعة الجسم قُبيل ارتطامه بالأرض بـ m/s.
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** $v_0 = 14.7\ m\ s^{-1}$ ، $y = 19.6\ m$ ، $g = 9.8\ m\ s^{-2}$ **المطلوب:** t ، x ، v
التمثيل:	**تُقسَّم الحركة إلى جزأين:** - **أفقيًا:** يتحرك الجسم بسرعة ثابتة $v_0 = 14.7\ m\ s^{-1}$ - **رأسيًا:** يسقط سقوطًا حرًا مسافة y = 19.6 m تحت تأثير الجاذبية. والمسار قطع مكافئ.
الاستراتيجية:	**أولًا:** استخدم الحركة الرأسية لإيجاد الزمن: $y = \frac{1}{2} g t^2$ **ثانيًا:** استخدم الحركة الأفقية لإيجاد المدى: $x = v_0 t$ **ثالثًا:** أوجد السرعة الرأسية قبل الارتطام باستخدام $v = g\,t$
الحل الموضح:	(أ) بما أن الجسم في سقوط حر رأسيًا، لتكن t زمن السقوط من مسافة 19.6 m: $y = \frac{1}{2} g t^2$ $\qquad 19.6 = \frac{1}{2} \times 9.8 \times t^2$ $19.6 = 4.9\ t^2$ $\qquad t^2 = 4$ $\because t > 0$ $\qquad \therefore t = 2\ s$ (ب) السرعة الأفقية ثابتة: $x = v_o\, t = 14.7 \times 2.0 = 29.4\ m$ $x \approx 29\ m$ (جـ) عند t = 2.0 s: المركبة الأفقية للسرعة $v_x = v_o = 14.7\ m\ s^{-1}$ والمركبة الرأسية للسرعة $v_y = g t = 9.8 \times 2.0 = 19.6\ m\ s^{-1}$ سرعة الجسم قُبيل الارتطام: $v = \sqrt{(v_x)^2 + (v_y)^2}$ $v = \sqrt{(14.7)^2 + (19.6)^2} = 24.5\ m.s^{-1}$ $\approx 25\ m$  $v_x = 14.7\ m\ s^{-1}$ $v = 24.5\ m\ s^{-1}$ $v_y = 19.6\ m\ s^{-1}$ v شكل (7.2.1)
منطقية الحل:	يسقط الجسم مدة 2.0 s، ويقطع مسافة 29.4 m أفقيًا، وتكون سرعته النهائية أكبر من سرعته الابتدائية لأن الجاذبية تزيد فقط المركبة الرأسية للسرعة.
فسِّرها بنفسك:	فسِّر النتائج التي حصلت عليها بكلماتك الخاصة.

تطبيق سريع

ينزلق هاتف من حافة نافذة على ارتفاع 4.9 m فوق الرصيف. أوجد زمن سقوطه.

حاول بنفسك:

قُذف جسم أفقيًّا بسرعة $3.0\ m/s$ من ارتفاع معيّن، فيصل إلى الأرض خلال $3.0\ s$ احسب الارتفاع الابتدائي والمدى الأفقي للجسم.

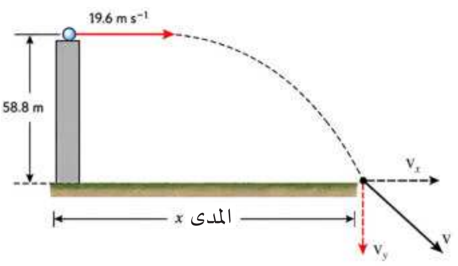
حاول:

(أ) قُذف جسم أفقيًّا بسرعة $19.6\ m/s$ من ارتفاع $58.8\ m$ فوق الأرض.

(i) أوجد الزمن اللازم (بالثانية) ليصل الجسم إلى الأرض.

(ii) أوجد المدى الأفقي للجسم بالمتر.

(iii) أوجد سرعة الجسم بـ $m\ s^{-1}$ قبل ارتطامه بالأرض.

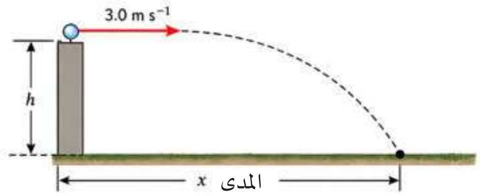

19.6 m s⁻¹
58.8 m
vₓ
v
v_y
المدى x

شكل (8.2.1)

(ب) يُقذف جسم أفقيًّا بسرعة $3.0\ m\ s^{-1}$ من ارتفاع معيّن، فيصل إلى الأرض خلال $3.0\ s$

(i) أوجد الارتفاع الابتدائي للجسم بالمتر.

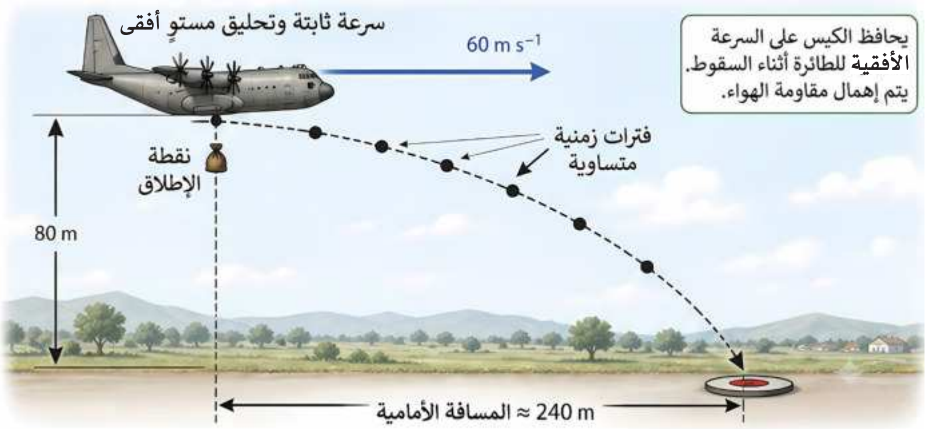
(ii) أوجد المدى الأفقي للجسم بالمتر.


3.0 m s⁻¹
h
المدى x

شكل (9.2.1)

في سياق جديد — الإسقاط قبل الهدف

تحلق طائرة إغاثة أفقيًّا بسرعة $60\ m\ s^{-1}$ على ارتفاع $80\ m$ فوق قرية غمرتها الفيضانات (قرية منكوبة)، تُسقط أكياس الحبوب المعبأة في أكياس مزدوجة التغليف إسقاطًا حرًّا فوق حقل محدَّد بعلامة. لا يستطيع الطيار الإسقاط فوق العلامة بالضبط. يغادر كل كيس الطائرة بسرعتها الأفقية، ويحافظ على هذه السرعة أفقيًّا (بغض النظر عن مقاومة الهواء)، بينما يسقط رأسيًّا تحت تأثير الجاذبية في الوقت نفسه. ويستغرق السقوط $t=\sqrt{\frac{2\times 80}{9.8}}\approx 4.0\ s$، يتحرك خلالها الكيس أفقيًّا تقريبًا مسافة قدرها $60\times 4.0\approx 240\ m$. لذا يجب أن يحدث الإسقاط قبل نحو $240\ m$ من وصول الطائرة إلى الهدف.


سرعة ثابتة وتحليق مستوٍ أفقي
60 m s⁻¹
يحافظ الكيس على السرعة الأفقية للطائرة أثناء السقوط. يتم إهمال مقاومة الهواء.
فترات زمنية متساوية
نقطة الإطلاق
80 m
المسافة الأمامية ≈ 240 m

شكل (10.2.1)

⇦ إذا حافظت الطائرة على سرعتها الأفقية الثابتة، يهبط الكيس تقريبًا مباشرة أسفل الطائرة — رغم أنه بعيد جدًّا عن نقطة إسقاطه. فسِّر كيف تكون العبارتان صحيحتين في آن واحد.

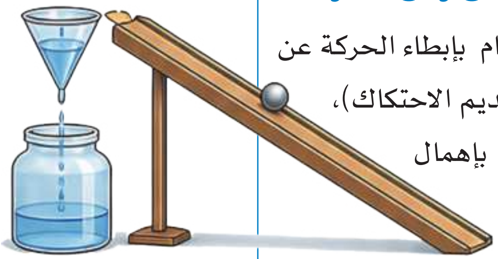
حقيقة أساسية

الارتفاع يحدد زمن الطيران.
والسرعة الأفقية تحدد المدى.
تراكب مركبتَي السرعة لإيجاد سرعة الهبوط (السرعة المحصلة).

سؤال للربط

هل يمكن حل مسائل حركة المقذوفات باستخدام الطاقة بدلاً من معادلات الحركة؟

طبيعة العلم: التجارب — إبطاء أثر الجاذبية لتسهيل قياس زمن الحركة



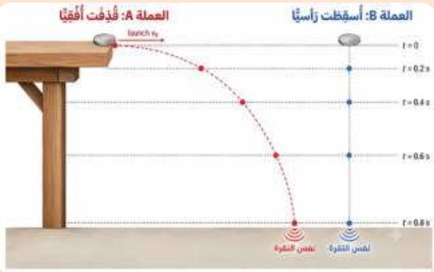
كان السقوط الحر أسرع من أن يتمكن جاليليو من قياس زمنه مباشرة، لذا قام بإبطاء الحركة عن طريق دحرجة كرات على أخاديد ناعمة قليلة الميل (مستوى مائل أملس عديم الاحتكاك)، وقاس زمنها بساعة مائية. وفي كتابه «علمان جديدان» (١٦٣٨)، أثبت أنه بإهمال مقاومة الهواء، فإن الجسم المقذوف يجمع بين الحركة الأفقية المنتظمة والحركة الرأسية تحت تأثير الجاذبية، لتكوّنا معًا مسارًا على شكل قطع مكافئ. وتجربة العملتين التي أجريتها تتبع نفس الفكرة.

دورك الآن: فسِّر لماذا تُعَدّ دراسة الحركة أسفل منحدر أملس عديم الاحتكاك مكافئة فيزيائيًا لدراسة السقوط الحر الرأسي المباشر.

سؤال الدرس، وإجابته:

عندما تُقذف عملة معدنية أفقيًا من فوق طاولة بينما تسقط عملة أخرى بجانبها في نفس اللحظة ، أيهما تصل الأرض أولًا — وما الذي يحدد النتيجة؟

لا تصل أي منهما أولًا، فهما تصلان في نفس اللحظة. فعند إهمال مقاومة الهواء، تحدد الجاذبية الحركة الرأسية بشكل مستقل عن الحركة الأفقية. وزيادة السرعة الأفقية تزيد المسافة الأفقية المقطوعة لكنها لا تغيّر زمن الطيران من نفس الارتفاع.



شكل (11.2.1)

تمرين:

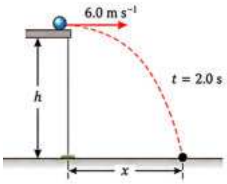
(أ) يُقذف جسم أفقيًا بسرعة $9.8\ \mathrm{m\,s^{-1}}$ من ارتفاع $14.7\ \mathrm{m}$ فوق الأرض.

(i) أوجد الزمن اللازم (بالثانية) ليصل الجسم إلى الأرض.

(ii) أوجد المدى الأفقي للجسم بالمتر.

(iii) أوجد سرعة الجسم بـ $\mathrm{m\,s^{-1}}$ قُبيل ارتطامه بالأرض.

(ب) يُقذف جسم أفقيًا بسرعة $6.0\ \mathrm{m\,s^{-1}}$ من ارتفاع معيّن، فيصل إلى الأرض خلال $2.0\ \mathrm{s}$

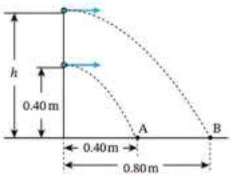


شكل (12.2.1)

(i) أوجد الارتفاع الابتدائي للجسم بالمتر.

(ii) أوجد المدى الأفقي للجسم بالمتر.

(جـ) يُقذف جسم أفقيًا من ارتفاع $0.40\ \mathrm{m}$ ويهبط عند النقطة A، الواقعة على مسافة أفقية $0.40\ \mathrm{m}$



شكل (13.2.1)

(i) أوجد الزمن بالثانية من لحظة القذف حتى وصول الجسم إلى الأرض.

(ii) أوجد السرعة الابتدائية للجسم بـ $\mathrm{m\,s^{-1}}$.

(iii) أوجد الارتفاع الابتدائي اللازم بالمتر ليسقط الجسم عند النقطة B، الواقعة على مسافة أفقية $0.80\ \mathrm{m}$، بافتراض السرعة الابتدائية نفسها.

نصيحة امتحانية

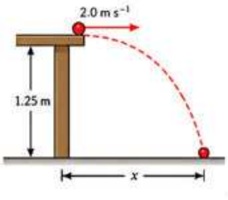
استخدم الزمن غير المقرَّب في الأجزاء القادمة؛ فالتقريب المبكر يقلل من دقة الإجابات القادمة.

سؤال بأسلوب الامتحان:

تتدحرج كرة من فوق منضدة أفقية ارتفاعها $1.25\ \mathrm{m}$ بسرعة $2.0\ \mathrm{m\,s^{-1}}$

(أ) احسب الزمن الذي تستغرقه الكرة لتصل إلى الأرض.

(ب) أوجد المسافة الأفقية من المنضدة التي تهبط عندها الكرة.



شكل (14.2.1)

الدرس ١-٣ — حركة المقذوفات بزاوية

؟ سؤال الدرس:
عند أعلى نقطة في مسار كرة مقذوفة بزاوية، هل تصل الكرة إلى حالة سكون لحظي؟

ستتعلم

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

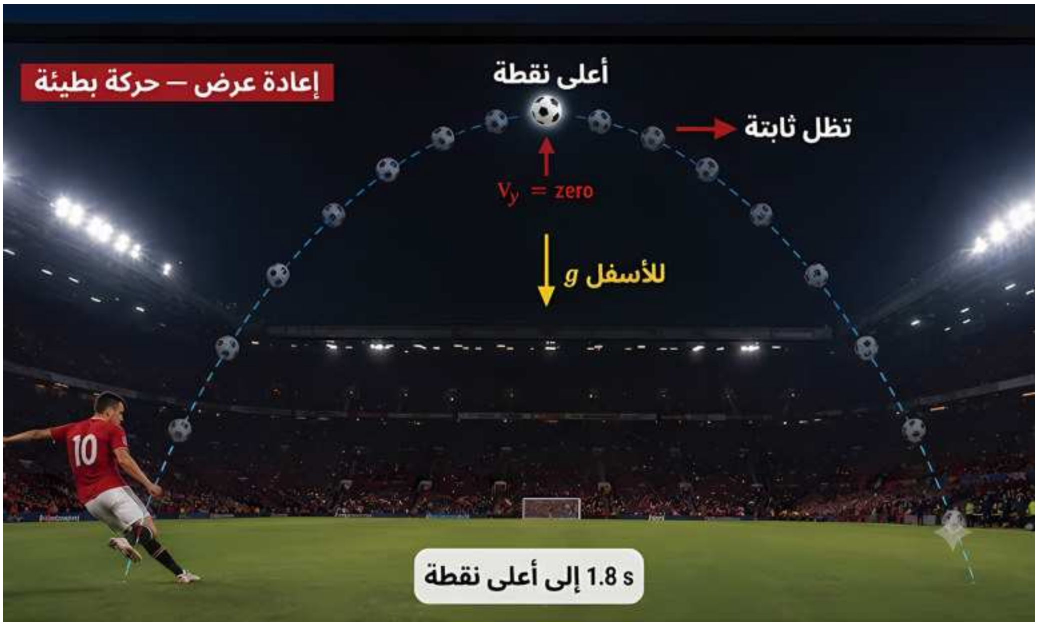
١. **تشرح** كيف يمكن تحليل مقذوف أُطلق بزاوية إلى مركبتي حركة مستقلتين.

٢. **تحسب** زمن الطيران وأقصى ارتفاع ومدى مقذوف أُطلق بزاوية.

٣. **تصف** حركة المقذوف عند أعلى نقطة، بما في ذلك مركبتا سرعته الأفقية والرأسية.

حقيقة أساسية:
مركبتا الحركة الأفقية والرأسية مستقلتان.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر



شكل (1.3.1)

شاهد إعادة بالحركة البطيئة لركلة حرة. تغادر الكرة قدم اللاعب، وترتفع، ويبدو أنها تتوقف للحظة عند أعلى نقطة في مسارها قبل أن تهبط نحو المرمى. يصف المعلقون هذا أحيانًا بـ«زمن التحليق». شاهد الإعادة مرة أخرى وركّز على أعلى نقطة: هل تكون الكرة في حالة سكون فعلي في تلك اللحظة؟

توقَّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

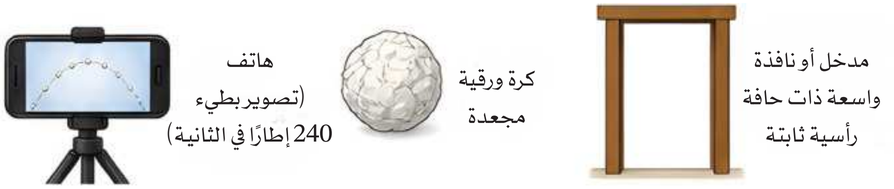
(أ) عند أعلى نقطة، هل تكون سرعة الكرة صفرًا، أم أقل ما يمكن لكنها ليست صفرًا، أم بلا تغيير؟

(ب) تستغرق الكرة 1.8 s للوصول إلى أعلى نقطة — فهل ستستغرق العودة إلى ارتفاع الإطلاق وقتًا أطول، أم أقصر، أم نفس الوقت؟

استكشف — التوقف عند أعلى نقطة

ما ستفعله: تستخدم فيديو الحركة البطيئة بهاتفك لتتبع مقذوف أُطلق بزاوية، وتبحث عن أنماط في حركته.

الزمن: 12 دقيقة


مدخل أو نافذة
واسعة ذات حافة
رأسية ثابتة
كرة ورقية
مجعدة
هاتف
(تصوير بطيء
240 إطارًا في الثانية)

شكل (2.3.1)

ما تحتاجه:

- هاتف بخاصية تصوير الحركة البطيئة
- باب له حافة رأسية واضحة
- كرة من ورق مجعّد
- مسطرة

الخطوات:

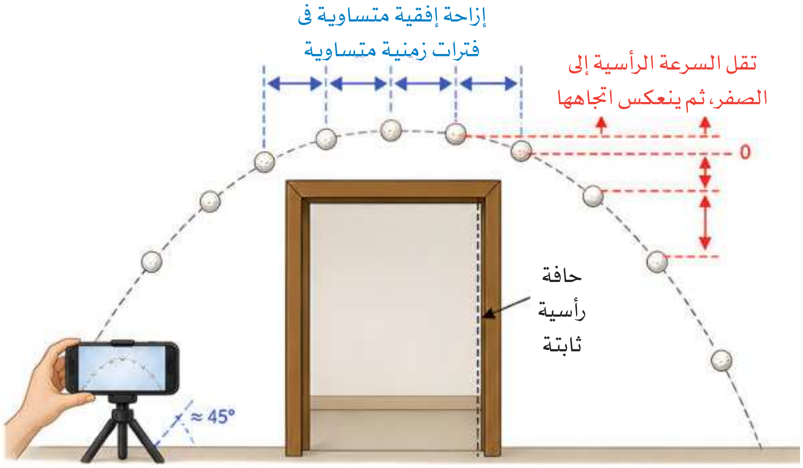
١ اقذف كرة الورق بزاوية 45° تقريبًا بحيث تتبع مسارًا منحنيًا عبر باب مفتوح؛ ويصورها أحد الشريكين بالحركة البطيئة مقابل حافة الباب.

٢ تصفح إطارات الفيديو بالقرب من أعلى نقطة في المسار، إطارًا تلو الآخر. راقب مركبتَي الحركة كلٌّ على حدة مقابل حافة الباب الثابتة.

٣ حدِّد مركز الكرة في كل إطار. وباستخدام المقياس، قِس المسافتين الأفقية والرأسية بين المواضع المتتالية.

٤ كرر التجربة بزاوية إطلاق تميل أكثر على المستوى الأفقي، وسجّل ملاحظاتك.

ملاحظة القياس: تعني أعداد الإطارات المتساوية فترات زمنية متساوية. قارن الإزاحة الأفقية خلال نفس العدد من الأطارات.


إزاحة إفقية متساوية فى
فترات زمنية متساوية
تقل السرعة الرأسية إلى
الصفر، ثم ينعكس اتجاهها
0
حافة
رأسيا
ثابتة
≈ 45°

شكل (3.3.1)

زاوية الإطلاق	التباعد الأفقي	التباعد الرأسي
45° تقريبًا		
تميل أكثر على المستوى الأفقي		

حلّل ما جمعته:

(أ) بالنسبة لكل زاوية إطلاق، هل ظلت الإزاحة الأفقية لكل إطار ثابتة تقريبًا في أثناء مرور الكرة بأعلى نقطة؟

(ب) كيف تغيّرت الحركة الرأسية أثناء مرور الكرة بأعلى نقطة؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

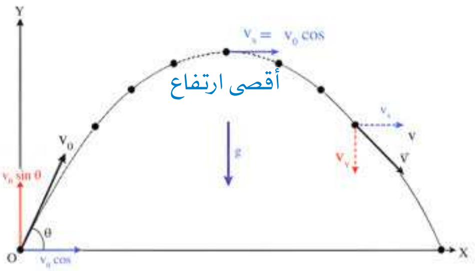
من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، وفي أثناء فحصك الفيديو إطارًا إطارًا، استمرت الكرة في التحرك أفقيًّا عبر أعلى نقطة بخطوات متساوية تقريبًا. في المقابل، تتناقص الإزاحة الرأسية بين الإطارات المتتالية مع ارتفاع الكرة، وتقترب من الصفر عند أعلى نقطة، ثم تعكس اتجاهها وتزداد مع هبوط الكرة. ولعلك توقعت أن تتوقف الكرة تمامًا عند أعلى نقطة، لكن دليل الفيديو يُظهر خلاف ذلك. والنموذج التالي يفسر ملاحظاتك.

تحليل حركة المقذوفات إلى مكوناتها:

حلِّل سرعة الإطلاق v_0 إلى مركبتين: المركبة الأفقية $v_x = v_0 \cos\theta$، وبإهمال مقاومة الهواء تبقى ثابتة. أما المركبة الرأسية، فتسلك الكرة فيها تمامًا سلوك جسم يُقذف إلى أعلى — تبدأ بمقدار $v_y = v_0 \sin\theta$ وتجذبها الجاذبية إلى الأسفل، فتصبح $v_y = v_0 \sin\theta - gt$ و $y = v_0 \sin\theta . t - \frac{1}{2}gt^2$، وتكون الحركتان المكوِّنتان مستقلتين، في نموذج انعدام مقاومة الهواء وثبات الجاذبية فقط، ولا تشتركان إلا في الزمن نفسه t.

وعند أعلى نقطة، تصبح المركبة الرأسية للسرعة وحدها صفرًا. أما المركبة الأفقية فتبقى ثابتة، لذا لا تصل الكرة أبدًا إلى حالة سكون فعلي.



شكل (4.3.1)

نقطة

- تُعرف حركة الجسم المقذوف بزاوية بالنسبة للأفق باسم "حركة المقذوفات". يتبع الجسم مسارًا قطعيًا مكافئًا، وتُحلَّل الحركة في المستوى الرأسي إلى مركبتين: أفقية ورأسية، حيث تُعامل كل منهما كحركة خطية مستقلة.

- **المركبتان هما:**

المركبة الأفقية: عند إهمال مقاومة الهواء، يتحرك الجسم بسرعة ثابتة تساوي المركبة الأفقية للسرعة الابتدائية v_0 [م/ث]؛ أي: $vx = v_0 \cos\theta$ و $x = v_0 \cos\theta \times t$.

الاتجاه الرأسي: يتحرك الجسم حركة مماثلة لحركة القذف الرأسي للأعلى، بتسارع ثابت مقداره $(-g)$ وسرعة رأسية ابتدائية مقدارها $v_0 \sin\theta$؛ وتكون المعادلات: $v_y = v_0 \sin\theta - gt$ و $y = v_0 \sin\theta \times t - \frac{1}{2}gt^2$.

- في حالة الانطلاق والهبوط عند الارتفاع نفسه، ومع إهمال مقاومة الهواء، تكون الحركة متماثلة حول الخط الرأسي المار بأعلى نقطة في المسار. فإذا كان الزمن المستغرق للوصول إلى أقصى ارتفاع هو 1.2 ثانية، فإن الزمن الكلي للحركة (زمن التحليق) يكون 2.4 ثانية؛ وإذا كانت المسافة الأفقية المقطوعة حتى الوصول إلى أقصى ارتفاع تساوي 3.0 أمتار، فإن المدى الأفقي الكلي يساوي 6.0 أمتار.

زمن الطيران:

الزمن الكلي من الإطلاق إلى الهبوط؛ عند نفس المستوى الافقي يساوي ضعف الزمن اللازم للوصول إلى أعلى نقطة من لحظة الاطلاق.

تطبيق سريع:

تُركل كرة بسرعة $14\ m\ s^{-1}$ بزاوية 30° الأفقي. أوجد مركبتَي سرعتها الابتدائية.

صندوق المعادلات:

الحركة الأفقية:	$a = 0 \rightarrow x = v_0 \cos\theta.t$
الحركة الرأسية:	$v_y = v_0 \sin\theta - gt$ $v_y = v_0 \sin\theta - gt, y = v_0 \sin\theta.t - \frac{1}{2}gt^2$

التماثل حول أعلى نقطة:

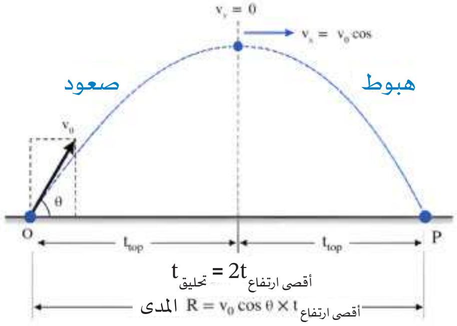
تكون الحركة متماثلة حول أعلى نقطة فقط عندما يكون الإطلاق والهبوط عند الارتفاع نفسه، وبدون مقاومة الهواء. ونتيجة لذلك، يتساوى الزمن اللازم للصعود إلى أقصى ارتفاع مع الزمن اللازم للهبوط إلى مستوى الإطلاق: $t_{\text{تحليق}} = 2t_{\text{أقصى ارتفاع}}$.

وبما أنه لا يوجد تسارع أفقي (بإهمال مقاومة الهواء)، تبقى السرعة الأفقية ثابتة طوال الحركة. لذا يُعطى المدى الأفقي بالعلاقة: $R = v_0 \cos\theta \times t_{\text{تحليق}}$.

فمثلاً، إذا وصل مقذوف إلى أعلى نقطة بعد 1.2 s، فسيعود إلى ارتفاعه الابتدائي بعد 2.4 s. وإذا كانت الإزاحة الأفقية عند أعلى نقطة 3.0 m، فإن المدى الأفقي الكلي يساوي 6.0 m، لأن الحركة الأفقية منتظمة.

كُتيّب البيانات:

معادلات الحركة. أولًا، حلِّل حركة المقذوف إلى مركبتين أفقية ورأسية بإهمال مقاومة الهواء، $a = -g$ و $u = v_0 \sin\theta$.


$v_y = 0$
$v_x = v_0 \cos$
صعود
هبوط
v_0
θ
O
P
t_{top}
t_{top}
$t_{\text{تحليق}} = 2t_{\text{أقصى ارتفاع}}$
المدى $R = v_0 \cos\theta \times t_{\text{أقصى ارتفاع}}$

شكل (5.3.1)

مثال محلول:

الموقف:	تُقذف كرة صغيرة من سطح الأرض بسرعة ابتدائية $19.6\ m\ s^{-1}$ بزاوية 30° أفقي. وتحدث الحركة تحت تأثير عجلة جاذبية ثابتة $g = 9.8\ m\ s^{-2}$ بدون مقاومة هواء.
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** $v_0 = 19.6\ m\ s^{-1}, \theta = 30°, g = 9.8\ m\ s^{-2}$ $\sin 30° = \frac{1}{2}, \cos 30° = \frac{\sqrt{3}}{2}$ **المطلوب:** (أ) الزمن اللازم للوصول إلى أقصى ارتفاع. (ب) المدى الأفقي.
التمثيل:	حلِّل السرعة إلى مركبتين: $v_{0x} = v_0 \cos\theta, v_{0y} = v_0 \sin\theta$ عند أقصى ارتفاع: $v_y = 0$. وحركة المقذوفات متماثلة (زمن الصعود = زمن الهبوط).

الاستراتيجية:	حلِّل السرعة الابتدائية إلى اتجاهين أفقي ورأسي، واستخدم معادلات الحركة بسرعة منتظمة للاتجاه الأفقي، ومعادلات الحركة بعجلة منتظمة إلى أعلى للاتجاه الرأسي.
الحل الموضح:	(أ) عند أقصى ارتفاع: $v_y = 0$ $v_y = v_0 \sin\theta - gt$ $0 = 9.8 - 9.8t$ $9.8t = 9.8$ $t = 1.0\ s$ الزمن الكلي للطيران: $2t = 2.0\ s$. (ب) المدى الأفقي: $R = v_0 \cos\theta \bullet t_{\text{تحليق}}$ $R = 19.6 \bullet \cos 30° \bullet 2.0$ $= 33.948 \approx 34\ m$
منطقية الحل:	الزمن $1.0\ s$ يتفق مع $v_0 y/g$. والمدى $\approx 34\ m$ معقول لمقذوف سرعته $19.6\ m\ s^{-1}$ بزاوية 30°. والحركة متماثلة (زمن الصعود = زمن الهبوط).
فسِّرها بنفسك:	لماذا يتيح تحليل الحركة إلى مركبتين أفقية ورأسية تحديد زمن الطيران والمدى كلٍّ على حدة، رغم أن المقذوف يتبع مسارًا منحنيًا؟

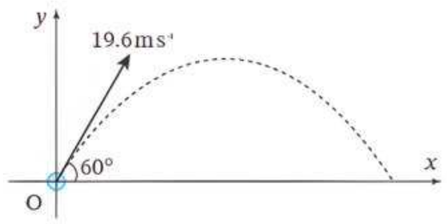
حاول بنفسك: تُركل الكرة نفسها بزاوية أكثر انحدارًا — $19.6\ m\ s^{-1}$ بزاوية 60° عن الأفقي.

احسب زمن الوصول إلى أقصى ارتفاع، وأقصى ارتفاع.

حاول:

تُقذف كرة صغيرة من سطح الأرض بسرعة $19.6\ m\ s^{-1}$ بزاوية 60° عن الأفقي.

أوجد ما يلي لأقرب رقمين عشريين، بافتراض أن عجلة الجاذبية الأرضية $9.8\ m\ s^{-2}$ وأن $\sqrt{3} \approx 1.73$.



شكل (6.3.1)

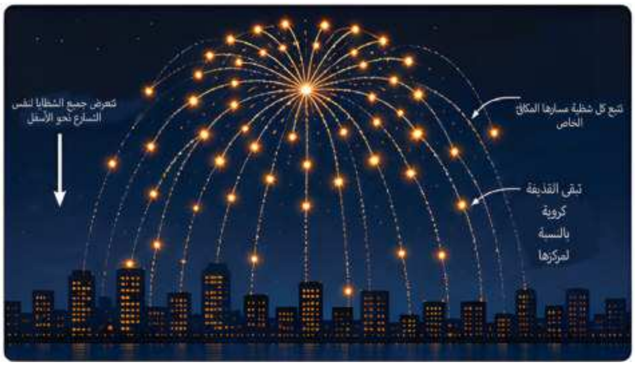
(أ) أوجد المركبة الأفقية للسرعة الابتدائية بـ $m\ s^{-1}$.

(ب) أوجد الزمن اللازم (بالثانية) لتصل الكرة إلى أقصى ارتفاع.

(جـ) أوجد أقصى ارتفاع تصل إليه الكرة بالمتر.

(د) أوجد المدى الأفقي بالمتر.

في سياق جديد — الألعاب النارية التي تظل كروية


تتبع كل شظية مسارها المكافئ الخاص
تبقى القذيفة كروية بالنسبة لمركزها
تتعرض جميع الشظايا لنفس التسارع نحو الأسفل

شكل (7.3.1)

تنفجر قذيفة ألعاب نارية عاليًا فوق المدينة، فتقذف كريات متوهجة تُسمى «شظايا» في جميع الاتجاهات. وتتحرك كل شظيا بعد ذلك كمقذوف مستقل، وتخضع لعجلة الجاذبية نفسها (g). وبإهمال مقاومة الهواء، تتبع كل شظيا مسارًا قطعًا مكافئًا بالنسبة إلى الأرض. ولأن قوة الجاذبية تكسب كل نجمة العجلة نفسها، فإنها لا تغيّر حركتها بالنسبة لبعضها بعضًا. وإذا قُذفت شظايا بسرعات متساوية تقريبًا في جميع الاتجاهات، فإنها تُشكّل نمطًا كرويًّا تقريبًا يتوسع. ويتبع مركز هذا النمط مسارًا قذفيًا، بينما يكبر حجم النمط لكنه يبقى كرويًا تقريبًا.

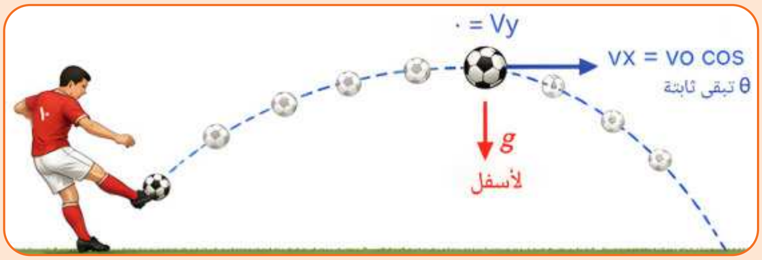
فسِّر: لماذا يبقى نمط شظايا المتوسع كرويًّا تقريبًا، رغم أن كل شظيا تتبع مسارًا قطعًا مكافئًا.

طبيعة العلم: النماذج — واضع النموذج حدّد حدوده

في كتابه «علمان جديدان» (١٦٣٨)، أثبت جاليليو أن المقذوف يتبع، في غياب مقاومة الهواء، مسارًا على شكل قطع مكافئ. وهذا هو النموذج المستخدم طوال هذا الدرس. لكنه أشار في العمل نفسه إلى أن مقاومة الهواء تجعل المسار الفعلي ينحرف عن القطع المكافئ، خصوصًا عند السرعات العالية. ولكل نموذج فيزيائي نطاق صلاحية، وقد حدَّد جاليليو نفسه حدود نموذج المقذوف الذي طوّره.

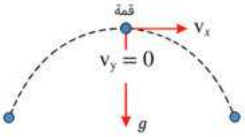
دورك الآن: اقترح ملاحظة واحدة من مباراة كرة قدم حقيقية لا يستطيع نموذج القطع المكافئ (بإهمال مقاومة الهواء) تفسيرها.

عند أعلى نقطة في مسار كرة تتحرك حركة قذفية بزاوية، هل تكون الكرة في حالة سكون لحظي؟ لا تصل أبدًا إلى سكون فعلي – تصبح المركبة الرأسية للسرعة صفرًا للحظة، بينما تبقى المركبة الأفقية ثابتة (بإهمال مقاومة الهواء). وتبقى العجلة متجهة إلى الأسفل طوال الحركة. ويبدو أن الكرة تتوقف فقط لأن حركتها الرأسية تتباطأ حتى الصفر قبل أن تعكس اتجاهها؛ أما حركتها الأفقية فلا تتوقف أبدًا.



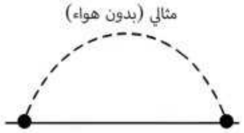
سؤال للربط:

كيف يؤثر مجال الجاذبية في حركة جسم؟



السرعة الرأسية فقط هي الصفر عند القمة؛ تبقى السرعة الأفقية وتبقى التسارع لأسفل.

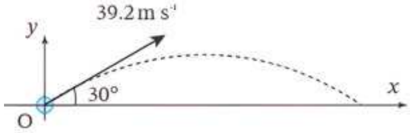
شكل (8.3.1)



شكل (9.3.1)

تمرين:

(أ) تُقذف كرة صغيرة من سطح الأرض بسرعة $39.2\ \text{m s}^{-1}$ بزاوية 30° أفقي.



شكل (10.3.1)

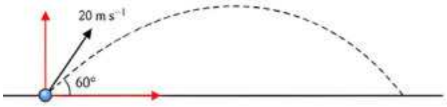
(i) أوجد المركبة الرأسية للسرعة الابتدائية بـ m s^{-1}.

(ii) أوجد المركبة الأفقية للسرعة بعد 1.5 s بـ m s^{-1}.

(iii) أوجد الزمن اللازم (بالثانية) لتصل الكرة إلى أقصى ارتفاع.

(iv) أوجد المدى الأفقي بالمتر.

(ب) تُقذف كرة صغيرة من سطح الأرض بسرعة $20\ \text{m s}^{-1}$ بزاوية 60° أفقي.

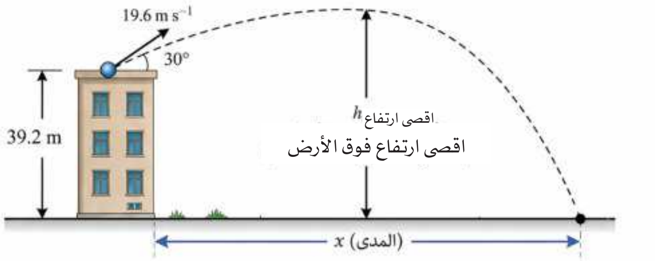


شكل (11.3.1)

(i) أوجد المركبة الأفقية للسرعة الابتدائية بـ m s^{-1}.

(ii) أوجد المركبة الرأسية للسرعة بعد 0.50 s بـ m s^{-1}.

(جـ) تُقذف كرة صغيرة من أعلى مبنى ارتفاعه 39.2 m فوق الأرض بسرعة $19.6\ \text{m s}^{-1}$ بزاوية 30° على الأفقي.



شكل (12.3.1)

(i) أوجد الزمن اللازم (بالثانية) لتصل الكرة إلى أقصى ارتفاع.

(ii) أوجد أقصى ارتفاع تصل إليه الكرة فوق الأرض بالمتر.

(iii) أوجد الزمن اللازم (بالثانية) لترتطم الكرة بالأرض.

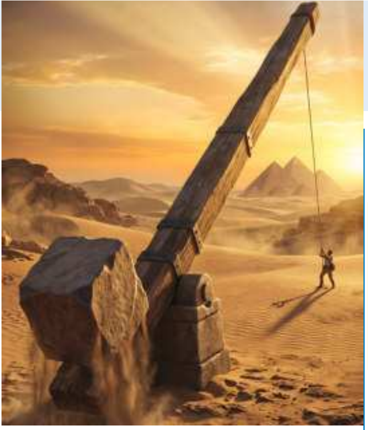
(iv) أوجد المدى الأفقي بالمتر.

سؤال بأسلوب الامتحان:

يُقذف حجر من مستوى الأرض بسرعة $12\ \text{m s}^{-1}$ بزاوية 30° أفقي.

(أ) اذكر المركبة الأفقية لسرعته عند أعلى نقطة.

(ب) احسب الزمن اللازم لعودة الحجر إلى الأرض.



الدرس ١–٤ — عزم القوة

؟ سؤال الدرس:

ادفع بابًا بالقوة نفسها في موضعين مختلفين — لماذا يدور بسهولة عند المقبض لكنه بالكاد يتحرك بالقرب من المفصلة؟

ستتعلم أن

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تحسب** عزم القوة بوصفه حاصل ضرب القوة في بُعدها العمودي عن نقطة الدوران.

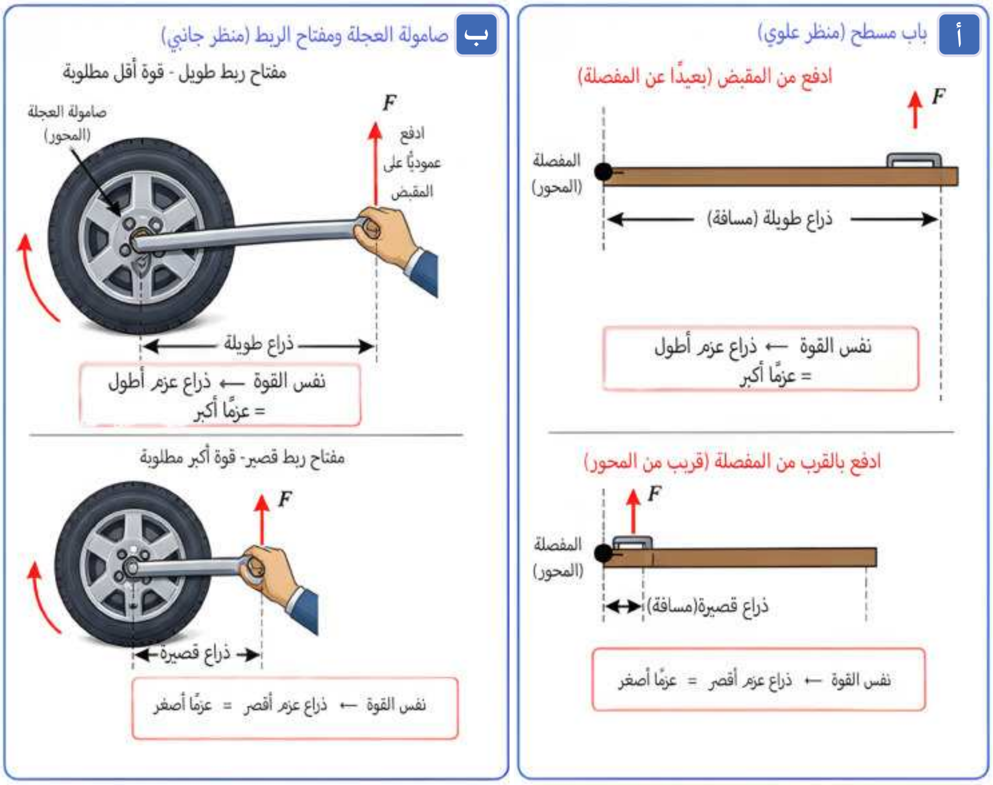
٢. **تحدد** ذراع العزم العمودي لقوة تؤثر بزاوية.

٣. **تحدد** إشارة العزم (موجبة أو سالبة) بحسب اتجاه دورانه.

⭐ حقيقة أساسية:

القوة دفع أو جذب له مقدار واتجاه. يركز هذا الدرس على تأثير الدوران (العزم) الذي تحدثه القوة حول نقطة معينة.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر


أ
باب مسطح (منظر علوي)
ادفع من المقبض (بعيدًا عن المفصلة)
F
المفصلة (المحور)
ذراع طويلة (مسافة)
نفس القوة ← ذراع عزم أطول = عزمًا أكبر
ادفع بالقرب من المفصلة (قريب من المحور)
F
المفصلة (المحور)
ذراع قصيرة(مسافة)
نفس القوة ← ذراع عزم أقصر = عزمًا أصغر
ب
صامولة العجلة ومفتاح الربط (منظر جانبي)
مفتاح ربط طويل - قوة أقل مطلوبة
صامولة العجلة (المحور)
F
ادفع عموديًا على المقبض
ذراع طويلة
نفس القوة ← ذراع عزم أطول = عزمًا أكبر
مفتاح ربط قصير- قوة أكبر مطلوبة
F
ذراع قصيرة
نفس القوة ← ذراع عزم أقصر = عزمًا أصغر

شكل (1.4.1)

يُفتح الباب بسهولة عند دفعه من المقبض، لكن فتحه يصبح أصعب كثيرًا عند دفعه بالقرب من المفصلة. وبالمثل، يفك مفتاح أطول صامولة عجلة محكمة الشد بسهولة أكبر من مفتاح أقصر. وفي كلتا الحالتين، القوة نفسها — والذي يتغيّر هو البُعد عن نقطة الارتكاز.

✎ توقَّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) هل يحدد مقدار القوة وحده تأثيرها الدوراني (العزم)؟

(ب) هل يجعل دفع الباب بالقرب من المفصلة فتحه أسهل لأن القوة أقرب إلى نقطة الارتكاز؟

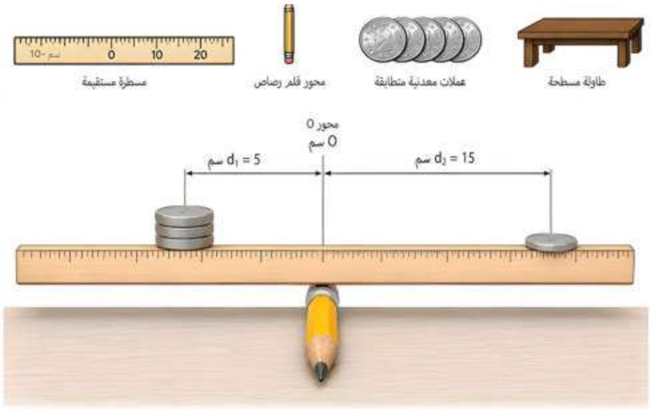
استكشف — دراسة أثر المسافة على الاتزان

ما ستفعله: تضع عملات متطابقة على مسافات مقاسة على جانبَي نقطة ارتكاز، وتسجل الترتيبات التي تُوازن المسطرة.

الزمن: 12 دقيقة

ما تحتاجه:

- مسطرة مستقيمة.
- قلم رصاص ليكون نقطة ارتكاز أسفل منتصف المسطرة.
- مجموعة صغيرة من العملات المتماثلة.
- طاولة (منضدة) مستوية.



شكل (2.4.1)

ملاحظة القياس:
اقرأ كل مسافة لأقرب تدريج على المقياس. كرر عملية الأتزان مرتين، فقد يختلف عدد العملات بمقدار واحدة بالقرب من نقطة الاتزان.

الخطوات:

١ ضع المسطرة على قلم الرصاص حتى تتوازن أفقيًا، مع وجود القلم أسفل علامة المنتصف.

٢ ضع عملة واحدة بالقرب من الطرف الأيمن ولاحظ ميل المسطرة نحو الأسفل في ذلك الجانب.

٣ أضف الآن عملات على الجانب الأيسر، بالقرب من القلم، حتى تتوازن المسطرة مجددًا.

٤ عُدّ عدد العملات اللازمة بالقرب من نقطة الارتكاز (n) لتتزن مع العملة الوحيدة البعيدة، وقِس كلا البُعدين.

٥ قرِّب العملة الوحيدة من القلم وكرر عملية الأتزان.

d_1	عدد العملات على الجانب الأيسر	d_2

حلّل ما جمعته:

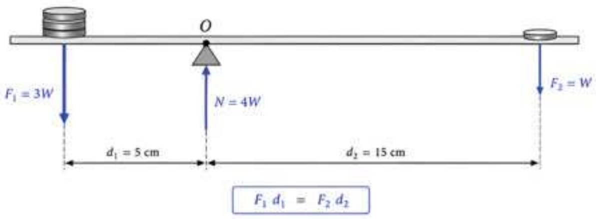
(أ) عندما وُضعت العملة الوحيدة بعيدًا عن نقطة الارتكاز، هل احتاجت إلى عملات قريبة أكثر أم أقل لتوازنها؟

(ب) اضرب عدد العملات على كل جانب في بُعدها عن نقطة الارتكاز. كيف يقارن الناتجان عند الاتزان؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، وازنت عدة عملات قريبة من نقطة الارتكاز عملة واحدة بعيدة عنها. وعند الاتزان، تساوى حاصل ضرب القوة في بُعدها على الجانبين، لا القوة وحدها. ولعلك توقعت أن مجموعة العملات الأثقل ستُميل المسطرة إلى الأسفل، لكن الدليل يشير إلى النموذج التالي.



شكل (3.4.1)

عزم القوة:

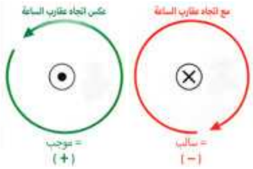
لا تكتفي القوة بدفع الجسم - بل يمكنها تدويره حول نقطة. ويعتمد مقدار تأثيرها الدوراني على عاملين معًا: مقدار القوة، والعد العمودي بين خط عملها ونقطة الارتكاز. ويُسمى هذا التأثير الدوراني عزم القوة حول النقطة. قِس القوة بالنيوتن والبُعد العمودي بالمتر؛ يكون العزم عندئذٍ بوحدة نيوتن.متر (N·m). ولنفس القوة إذا تضاعف البُعد، يتضاعف عزم القوة. وعزم القوة حول نقطة هو حاصل ضرب القوة في البُعد العمودي عن تلك النقطة.

⭐ عزم القوة:

التأثير الدوراني للقوة حول نقطة؛ ووحدته نيوتن.متر (N.m).

اتجاه الدوران — إشارة العزم:

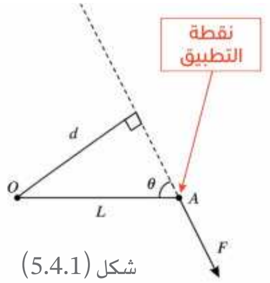
يمكن أن تُحدث القوة عزمًا حول نقطة معيّنة في أحد اتجاهين: عكس اتجاه عقارب الساعة أو معه. ونميّز بين هذين الاتجاهين باستخدام اصطلاح إشارة، بحيث يُعَدّ الدوران عكس عقارب الساعة موجبًا والدوران مع عقارب الساعة سالبًا. لذا يحمل كل عزم مقدارًا وإشارة معًا. فالعزم عكس اتجاه عقارب الساعة **موجب**؛ والعزم مع اتجاه عقارب الساعة **سالب**.



شكل (4.4.1)

عندما تكون القوة مائلة — ذراع العزم:

عندما تكون القوة مائلة، يُحدَّد ذراع العزم بالبُعد العمودي من النقطة O إلى خط عمل القوة. وبالنسبة لقوة F كما في الشكل، وبما أن $d = L \sin\theta$، فإن عزم القوة حول النقطة O يُعطى بالعلاقة $M = FL \sin\theta$.



شكل (5.4.1)

نقطة

❗ يُطلق اسم "الجسم الجاسئ" (أو الجسم الصلب) على الجسم الممتد المثالي الذي لا يتشوه عند تسليط قوة عليه. ويتحدد التأثير الدوراني لقوة ما حول نقطة (O) من خلال حاصل ضرب مقدار القوة في المسافة العمودية من النقطة (O) إلى خط عمل القوة؛ ويُعرف هذا المقدار بـ "عزم القوة" حول النقطة (O)، وتُقاس وحدته بالنيوتن-متر (N.m). أما المسافة العمودية من النقطة (O) إلى خط عمل القوة فتُسمى "ذراع العزم".

❗ إذا رمزنا لعزم القوة بالرمز M [N·m]، ولمقدار القوة بالرمز F [N]، ولطول ذراع العزم بالرمز d [m]، فإن العلاقة تُكتب بالصيغة: $M = Fd$. وفي حالة القوة F التي تؤثر بزاوية معينة، وبما أن $d = L \sin\theta$، فإن العزم حول النقطة (O) يُحسب بالمعادلة: $M = FL \sin\theta$.

❗ يمكن للقوة أن تُدوِّر الجسم حول نقطة ما إما عكس اتجاه عقارب الساعة أو في اتجاه عقارب الساعة، ويتم التمييز بين هاتين الحالتين بتحديد إشارة موجبة أو سالبة للعزم. وعليه، فإن عزم القوة حول نقطة تقع على خط عملها يساوي صفراً (0 N.m)؛ لأن المسافة العمودية إلى خط عمل القوة في هذه الحالة تساوي صفراً (0 m).

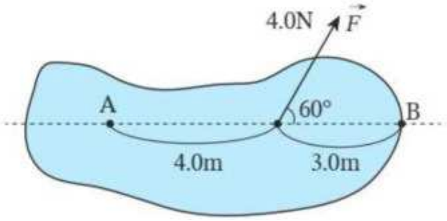
⭐ نصيحة امتحانية:

قبل حساب العزم حول النقطة O، ارسم البُعد العمودي من النقطة O إلى خط عمل القوة.

صندوق المعادلات:

عزم القوة:	$M = Fd$
عزم قوة مائلة:	$M = FL \sin\theta$

مثال محلول:



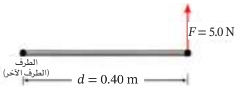
شكل (6.4.1): يوضح القوة F عند النقطتين A وB

الموقف:	تؤثر قوة مقدارها 4.0 N كما في الشكل. أوجد عزم القوة حول النقطتين A وB. اعتبر عكس اتجاه عقارب الساعة موجبًا، واستخدم $\sqrt{3} \approx 1.7$.
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** $F = 4.0$ N، الزاوية = 60°، البُعد إلى $A = 4.0$ m، البُعد إلى $B = 3.0$ m. **المطلوب:** إيجاد العزم حول A و B.
التمثيل:	العزم = القوة × البُعد العمودي ← $M = F\,d$ حيث $d = L \sin\theta$.
الاستراتيجية:	قِس البُعد من نقطة الدوران إلى نقطة تأثير القوة. أوجد البُعد العمودي. طبِّق $M = FL \sin\theta$. حدِّد الإشارة (+ عكس عقارب الساعة، – مع عقارب الساعة).
الحل الموضح:	(أ) حول النقطة A $M = F\,L \sin\theta$ $= 4.0 \times 4.0 \times \sin 60°$ $= 13.6 \approx 14$ N m الدوران عكس اتجاه عقارب الساعة ← $M = +14$ N.m. (ب) حول النقطة B $M = -F\,L \sin\theta$ $= -4.0 \times 3.0 \times \sin 60°$ $= -10.2 \approx -10$ N m
منطقية الحل:	القوة نفسها تؤثر في الحالتين، لكن النقطة A لها بُعد عمودي أكبر عن خط عمل القوة من النقطة B، لذا يكون مقدار العزم عند A أكبر.
فسِّرها بنفسك:	فسِّر لماذا يكون مقدار العزم حول النقطة A أكبر من مقداره حول النقطة B، رغم تأثير القوة نفسها.

جرِّب بنفسك: تؤثر القوة نفسها 4.0 N على الجسم نفسه. خذ نقطة C على الخط، على بُعد 2.0 m من نقطة التأثير. تكون القوة مائلة بزاوية 60°، وتُدوِّر الجسم مع اتجاه عقارب الساعة حول C. أوجد عزم القوة حول C بوحدة N.m.

تطبيق سريع:

تؤثر قوة مقدارها 5.0 N عموديًا عند طرف قضيب طوله 0.40 m. احسب العزم حول الطرف الآخر باستخدام M = Fd.

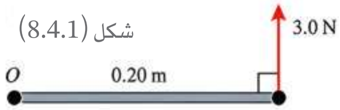


شكل (7.4.1)

حاول:

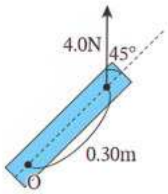
لكل شكل، أوجد عزم القوة حول النقطة O. اعتبر اتجاه عكس عقارب الساعة موجبًا.

(أ) تقع O عند الطرف الأيسر لقضيب أفقي. يمتد ذراع أفقي طوله 0.20 m من O. تؤثر قوة مقدارها 3.0 N عموديًا عند الطرف الأيمن. (القوة عمودية على الذراع – وطول الذراع هو البُعد العمودي.)

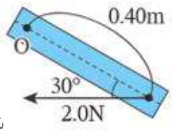


شكل (8.4.1)

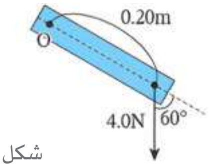
(ب) لقضيب مائل نقطة O عند طرفه السفلي. ويميل القضيب بزاوية ما عن الأفقي. تؤثر قوة مقدارها 4.0 N عند الطرف العلوي، على بُعد 0.30 m من O بمحاذاة القضيب. وتؤثر القوة بزاوية 45° على القضيب. أوجد عزم القوة حول النقطة O.


4.0N
45°
0.30m
O
شكل (9.4.1)

(جـ) لقضيب مائل النقطة O عند طرفه العلوى. وتؤثر قوة مقدارها 2.0 N نحو اليسار عند الطرف السفلي، على بُعد 0.40 m من O. وتؤثر القوة بزاوية 30° على القضيب، متجهة نحو اليسار.


0.40m
O
30°
2.0N
شكل (10.4.1)

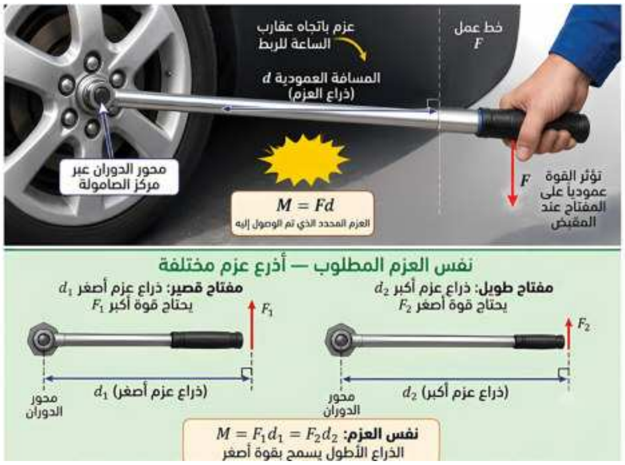
(د) تقع النقطة O عند الطرف العلوي الأيسر لقضيب. تؤثر قوة مقدارها 4.0 N على بُعد 0.20 m من O، كما في الشكل، وتُدوِّر القضيب مع اتجاه عقارب الساعة.


0.20m
O
4.0N
60°
شكل (11.4.1)

ملاحظة عملية:
في (ب) و(جـ) و(د) تكون القوة مائلة، لذا أوجد أولاً ذراع العزم العمودي $d = L \sin \theta$، ثم اضربه في القوة، ثم حدّد إشارة الدوران.

في سياق ورشة عمل — استخدام مفتاح عزم

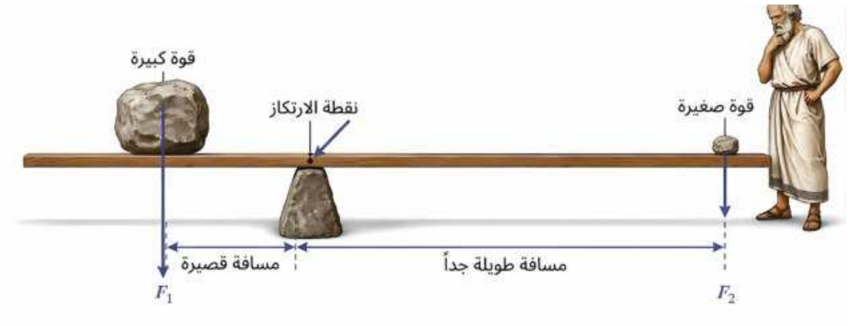
في ورشة سيارات أو طائرات، يجب إحكام ربط صامولة العجلة لحدوث تأثير الدوراني الصحيح. فإذا كانت الصامولة غير محكمة الربط، فقد تنفك؛ وإذا كانت محكمة جدًا، فقد يتلف المسمار. لذا يستخدم الفنيون مفتاح عزم: أداة تُصدر صوتًا مسموعًا عند بلوغ عزم القوة المطلوب. وأثناء سحب الفني، يعتمد الأثر الدوراني على القوة والذراع العمودي. ويتيح المفتاح الأطول ذراعًا أكبر، فتنتج قوة أصغر نفس العزم. وتُطلَق الصوت عند بلوغ العزم المحدَّد مسبقًا – الذي يُسمى غالبًا عزم الدوران (torque) في السياقات الهندسية – لا عند بلوغ القوة وحدها.


عزم باتجاه عقارب الساعة للربط
خط عمل F
المسافة العمودية d (ذراع العزم)
محور الدوران عبر مركز الصامولة
$M = Fd$
العزم المحدد الذي تم الوصول إليه
F
تؤثر القوة عموديا على المفتاح عند المقبض
نفس العزم المطلوب — أذرع عزم مختلفة
مفتاح قصير: ذراع عزم أصغر d_1
يحتاج قوة أكبر F_1
F_1
مفتاح طويل: ذراع عزم أكبر d_2
يحتاج قوة أصغر F_2
F_2
d_1 (ذراع عزم أصغر)
محور الدوران
d_2 (ذراع عزم أكبر)
محور الدوران
نفس العزم: $M = F_1 d_1 = F_2 d_2$
الذراع الأطول يسمح بقوة أصغر
شكل (12.4.1)

دورك الآن: فسِّر لماذا يبلغ مفتاح العزم الأطول العزم المحدَّد نفسه بقوة أصغر، مستخدمًا العلاقة: القوة × الذراع العمودية.

حقيقة أساسية:
وحدة العزم هي N.m. ورغم أن لها لأبعاد الأساسية نفسها التي للجول، فإنها لا تُستخدم بالطريقة نفسها: يُستخدم N.m للعزم لقياس تأثير لدوران، بينما يُستخدم J للطاقة لقياس طاقة منقولة أو مخزَّنة.

طبيعة العلم: أرشميدس والرافعة — قانون الميكانيكا المبكر


قوة كبيرة
نقطة الارتكاز
قوة صغيرة
مسافة قصيرة
مسافة طويلة جداً
F_1
F_2

قوة × ذراعها = قوة × ذراعها

قوة كبيرة × ذراع قصير = قوة صغيرة × ذراع طويل

شكل (13.4.1)

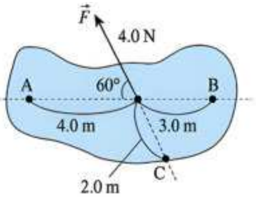
قبل أكثر من ألفي عام، صاغ أرشميدس قانون الرافعة. فوزن صغير بعيد عن نقطة الارتكاز يمكن أن يوازن وزنًا كبيرًا قريبًا منها، عندما يتساوى حاصل ضرب الوزن في البُعد على الجانبين. ويُروى أنه قال: «أعطوني موضعًا أقف عليه وسأحرك الأرض». وكانت هذه واحدة من أقدم القواعد الكمية الدقيقة المعروفة للتأثير الدوراني للقوة. وهي حاصل الضرب نفسه – القوة × الذراع العمودي – الذي استخدمته طوال هذا الدرس. (المصدر: أرشميدس، في اتزان المستويات، نحو ٢٥٠ ق.م.)

دورك الآن: اقترح أداة يومية واحدة تستخدم مبدأ أرشميدس للرافعة لإنتاج عزم كبير من قوة صغيرة تؤثر بعيدًا عن نقطة الارتكاز.

سؤال الدرس، وإجابته:

ادفع بابًا بالقوة نفسها في موضعين مختلفين – لماذا يدور بسهولة عند المقبض لكنه بالكاد يتحرك بالقرب من المفصلة؟ لأن العزم يعتمد على كل من القوة وبُعدها العمودي عن المفصلة، لا على القوة وحدها. فعند المقبض تكون الذراع طويلة، لذا يكون العزم كبيرًا؛ وبالقرب من المفصلة تكون الذراع صغيرة، لذا يكون العزم صغيرًا. وحدِّد إشارة لهذا العزم – موجب عكس عقارب الساعة، وسالب معها – ويكون العزم موصوفًا بالكامل وفق هذا الاصطلاح المستوي للإشارة. وعزم القوة هو حاصل ضرب القوة في البُعد العمودي من النقطة إلى خط تأثير القوة: أثر بقوة بعيدًا عن نقطة الارتكاز، وستُنتج القوة نفسها عزمًا أكبر بكثير.

تمرين:


$\vec{F}$
4.0 N
A
60°
B
4.0 m
3.0 m
C
2.0 m

شكل (15.4.1)

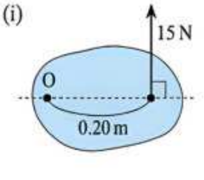
(أ) كما في الشكل على اليسار، عندما تؤثر قوة F مقدارها 4.0 N،

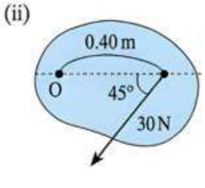
أوجد عزم القوة حول كل نقطة من النقاط التالية.

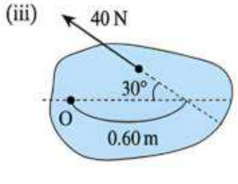
اعتبر اتجاه عكس عقارب الساعة موجبًا.

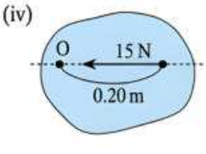
(i) النقطة A (ii) النقطة B (iii) النقطة C

(ب) لكل شكل من الأشكال التالية، أوجد عزم القوة حول النقطة O. اعتبر اتجاه عكس عقارب الساعة موجبًا.

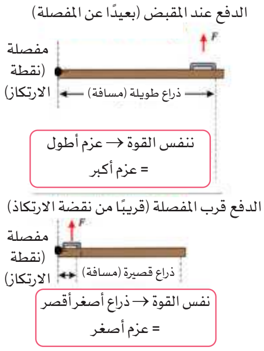



(ii)
0.40 m
O
45°
30 N


(iii)
40 N
30°
O
0.60 m


(iv)
O
15 N
0.20 m

شكل (14.4.1)

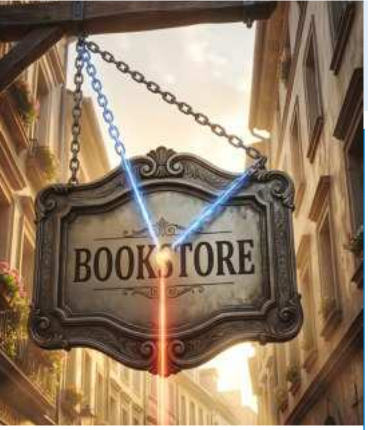

الدفع عند المقبض (بعيدًا عن المفصلة)
F
مفصلة (نقطة الارتكاز)
ذراع طويلة (مسافة)
ننفس القوة → عزم أطول
= عزم أكبر
الدفع قرب المفصلة (قريبًا من نقضة الارتكاذ)
F
مفصلة (نقطة الارتكاز)
ذراع قصيرة (مسافة)
نفس القوة → ذراع أصغر أقصر
= عزم أصغر

حقيقة أساسية:

القوة التي يمر خط تأثيرها عند نقطة الارتكاز لها ذراع عمودية تساوي صفرًا، لذا تُنتج عزمًا صفريًا – فالبعد العمودي، لا القوة وحدها، هو ما يحدد العزم.

سؤال بأسلوب الامتحان:

تؤثر قوة مقدارها 6,0 N عند طرف رافعة طولها 0,50 m، بزاوية 30° على الرافعة. أوجد عزم القوة حول الطرف الآخر من الرافعة، مع تحديد إشارته للدوران عكس اتجاه عقارب الساعة.



الدرس ١-٥ — اتزان القوى

؟ سؤال الدرس:

يبقى كتاب في حالة سكون على طاولة، وتُعلَّق لافتة متجر بواسطة كابلين – ما الصحيح بشأن القوة المحصلة المؤثرة في كل جسم؟

ستتعلم أن

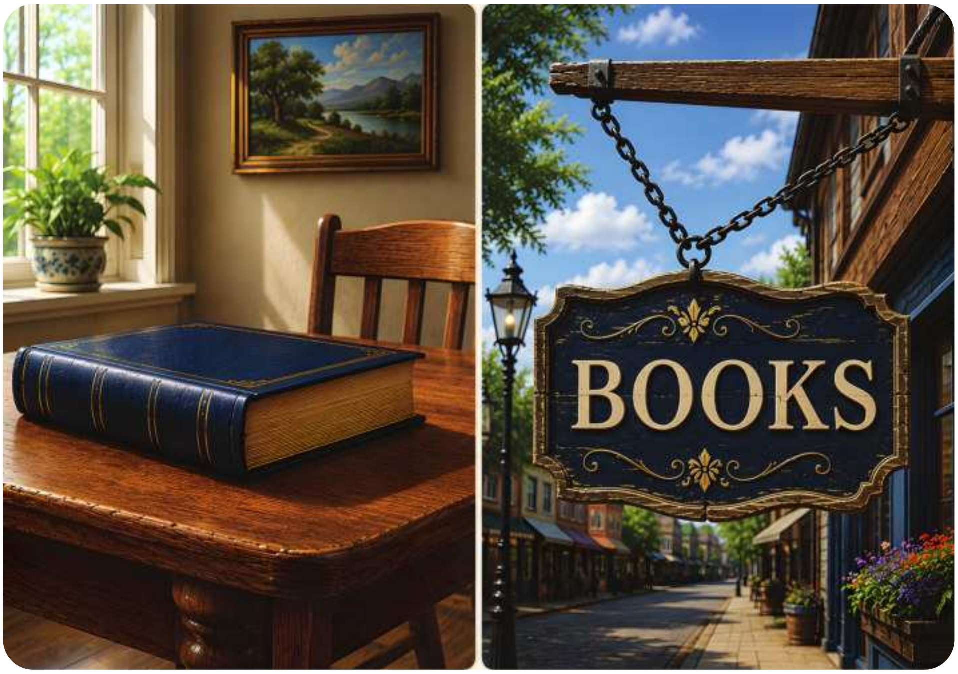
بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تذكر** شرط الاتزان لجسم ساكن أو يتحرك بسرعة ثابتة.

٢. **ترسم** مخطط الجسم الحر، بعزل الجسم وتوضيح جميع القوى الخارجية المؤثرة عليه، وتحديد مصدر كل قوة.

٣. **تحدد** قوة مجهولة بتحليل القوى إلى مركبات على طول محورين متعامدين وتطبيق شرط الاتزان على كل محور.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر



شكل (1.5.1)

يستقر كتاب ثقيل في حالة سكون على طاولة. يؤثر وزنه إلى أسفل بسبب الجاذبية، ومع ذلك يبقى الكتاب ساكنًا بفعل الطاولة. وبالقرب منه، تتدلى لافتة متجر ثقيلة دون حراك من سلسلتين مائلتين بزاويتين مختلفتين: إحداهما شديدة الانحدار، والأخرى أقرب إلى الأفقي.

توقَّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) ما القوة، إن وُجدت، التي تؤثر بها الطاولة على الكتاب؟

(ب) تتعلق اللافتة بسلسلتين بزاويتين مختلفتين. أي السلسلتين بها (قوة الشد) الأكبر: الأبعد أم الأقرب إلى المستوى الأفقي؟

استكشف — زيادة الزاوية، وقياس الاستطالة

ما ستفعله: تقيس استطالة شريطين مطاطيين متطابقين مع تغيير زاويتهما مع الرأسي، مع إبقاء الحمل ثابتًا.

الزمن: 12 دقيقة

ما تحتاجه:

- زجاجة ماء مملوءة معلومة الوزن.
- شريطان مطاطيان متطابقان.
- مسطرة.
- منقلة.
- قضيب أفقي أو خطافان يمكن تحريكهما بعيدًا عن بعضهما.

الخطوات:

١ علِّق الزجاجة باستخدام شريطين مطاطيين متطابقين. اضبط الخطافين بحيث يصنع كل شريط زاوية صغيرة مع الرأسي.

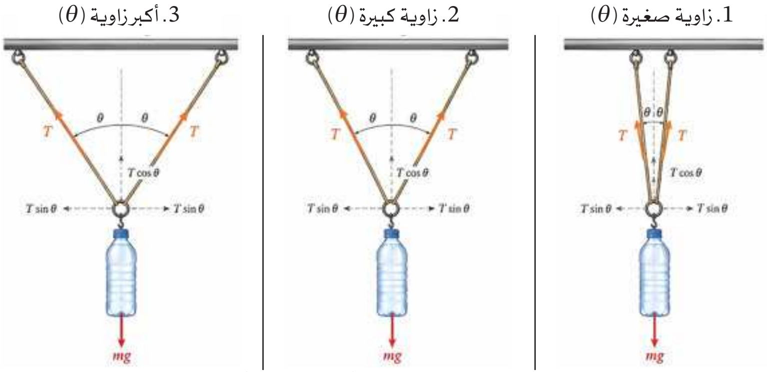
٢ قِس استطالة كل شريط مطاطي، وسجِّل الزاوية التي يصنعها كل شريط مع الرأسي.

٣ أبقِ الزجاجة نفسها، وحرِّك نقطتَي التثبيت العلويتين بعيدًا عن بعضهما بحيث يصنع الشريطان زاوية أكبر مع الرأسي.

٤ قِس استطالة كل شريط مطاطي مرة أخرى.

٥ كرر العملية لعدة زوايا أكبر، دون تجاوز حد المرونة للمطاط.

ملاحظة القياس: قِس استطالة كل شريط مرتين واحسب المتوسط. استخدم الشريطين نفسيهما طوال التجربة، وقارن متوسط الاستطالة بين الزوايا المختلفة بدلًا من مقارنته بقيمة ثابتة.


1. زاوية صغيرة (θ) — 2. زاوية كبيرة (θ) — 3. أكبر زاوية (θ)

$(2\,T\text{con}\,\theta = \text{mg})$ شد أكبر ← زاوية أكبر

شكل (2.5.1)

المحاولة	هل تغيِّر وزن الزجاجة؟	استطالة الشريط الأيمن (cm)	استطالة الشريط الأيسر (cm)	زاوية كل شريط عن الرأسي (°) θ	متوسط الاستطالة (cm)
١					
٢					
٣					

حلِّل ما جمعته:

(أ) مع زيادة الزاوية عن المستوى الرأسي، ماذا حدث لاستطالة كل شريط، وبالتالي للشد فيه؟

(ب) بقي وزن الزجاجة ثابتًا، فلماذا زاد الشد في كل شريط؟ ماذا حدث للمركبتين الأفقيتين لقوتَي الشد مع ابتعاد الشريطين عن بعضهما؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

في تجربة الاستكشاف بقي وزن الزجاجة ثابتًا، لكن زيادة الزاوية التي يصنعها كل شريط مطاطي مع الرأسي زادت متوسط استطالة الشريطين، مما يدل على زيادة الشد في كل شريط.

ولعلك توقعت أن يبقى الشد ثابتًا لأن الوزن لم يتغيَّر. لكن الملاحظات تُظهر أن الشد اللازم لدعم الزجاجة لا يعتمد على وزنها فقط، بل أيضًا على الزاوية التي يصنعها كل شريط مع الرأسي. وتؤيد الأدلة النموذج التالي.

اعزل الجسم — ارسم مخطط الجسم الحر:

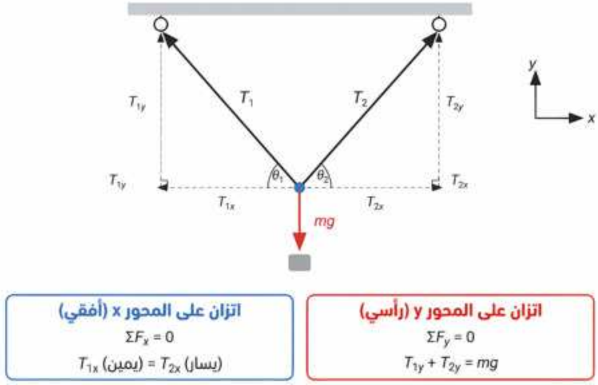
القوة: دفع أو جذب يؤثر به جسم في آخر. ولتحليل جسم، اعزله أولًا عن محيطه. وأظهر فقط القوى الخارجية المؤثرة فيه، لا القوى التي يؤثر بها الجسم في أجسام أخرى. ومثِّل كل قوة بسهم يبيّن اتجاهها، وسمِّها بحسب مصدرها. وحيثما أمكن، ارسم كل قوة عند نقطة تأثيرها. ويُمثَّل وزن الجسم بقوة واحدة تؤثر إلى أسفل عبر مركز ثقله.

يعزل مخطط الجسم الحر جسمًا واحدًا ويُظهر جميع القوى الخارجية المؤثرة فيه، **مع تحديد مصدر كل قوة.**

القوة	الرمز	المصدر والاتجاه
القوة العمودية	F_N	سطح ملامسة؛ تؤثر عموديًّا على السطح. لجسم في اتزان رأسي على سطح أفقي بدون قوى رأسية أخرى، $F_N = mg$.
الشد	T	حبل أو كبل مشدود؛ يؤثر على طول الحبل، متجهًا بعيدًا عن الجسم.
القوة المرنة	$F_e = -kx$	نابض مشدود أو مضغوط؛ يؤثر عكس الإزاحة عن وضع الاتزان. ضمن حد التناسب.
الوزن	$F_g = mg$	مجال الجاذبية للأرض (أو كوكب)؛ يؤثر رأسيًّا إلى أسفل عبر مركز الثقل.

طبِّق شرط الاتزان:

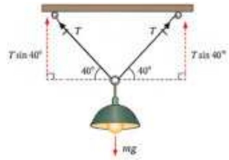
يكون الجسم في اتزان انتقالي عندما يبقى ساكنًا أو يتحرك بسرعة ثابتة؛ ويحدث هذا عندما تكون القوة المحصلة المؤثرة فيه صفرًا: $\Sigma F = 0$. ويمكن تحليل قوة تؤثر بزاوية إلى مركبتين على طول محورين متعامدين. ثم يُطبَّق شرط الاتزان بشكل مستقل على كل محور: $\Sigma F_x = 0$ و $\Sigma F_y = 0$. وبالنسبة للزجاجة المعلَّقة، تتساوى المركبتان الأفقيتان لقوتَي الشد في المقدار وتتعاكسان في الاتجاه، فتُلغي إحداهما الأخرى. وتؤثر المركبتان الرأسيتان إلى أعلى وتتزنان (تساويان) معًا وزن الزجاجة. لذا تكون القوة المحصلة على الزجاجة صفرًا، وتبقى في حالة اتزان.



شكل (4.5.1)

تطبيق سريع:

يتدلى مصباح كتلته 5.0 kg من كابلين يصنع كل منهما زاوية 40° مع الأفقي. بافتراض $g = 9.8\ m\,s^{-2}$، احسب المركبة الرأسية التي يجب أن يوفرها كل كبل.



شكل (3.5.1)

نقطة

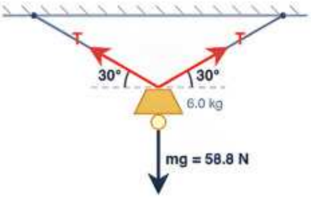
! إذا ظل الجسم الجاسئ ساكناً أو تحرك بسرعة ثابتة تحت تأثير عدة قوى، يُقال إنه في حالة اتزان. ولتحليل هذه الحالة، يجب أولاً عزل الجسم عن محيطه ورسم "مخطط الجسم الحر" الذي يوضح فقط القوى الخارجية المؤثرة عليه؛ حيث يُمثَّل وزن الجسم بقوة واحدة تتجه نحو الأسفل وتؤثر عند مركز ثقله.

! $F_1 + F_2 + F_3 + \ldots = 0$. وتُصاغ معادلات الاتزان عن طريق تحليل القوى إلى مركباتها على طول محورين متعامدين، لتصبح: $\Sigma Fx = 0$ و $\Sigma Fy = 0$.

صندوق المعادلات:

شرط الاتزان الانتقالي:	$\Sigma F = 0$
مركبتا القوة على طول محورين متعامدين:	$\Sigma F_x = 0 , \Sigma F_y = 0$

مثال محلول:

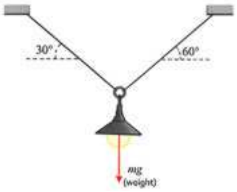
الموقف:	يتدلى مصباح كتلته 6.0 kg في حالة اتزان بواسطة كابلين متطابقين، يصنع كل منهما زاوية 30° مع الأفقي. احسب الشد في كل كابلين.
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** $m = 6.0\ \text{kg} , g = 9.8\ \text{m s}^{-2} , \theta = 30°$. **المطلوب:** الشد T في كل كبل.
التمثيل:	 شكل (5.5.1)
الاستراتيجية:	طبِّق شرط الاتزان: $\Sigma F_y = 0$ ، $\Sigma F_x = 0$. استخدم التوازن الرأسي: مجموع المركبتين الرأسيتين للشد يساوي الوزن.
الحل الموضح:	$2T \sin 30° = W$ $T = W/(2 \times \sin 30°)$ $= 58.8/(2 \times 0.5)$ $= 58.8\ \text{N} \approx 59\ \text{N}$
منطقية الحل:	يساوي الشد في كل كبل وزن المصباح؛ لأنه عند زاوية 30 درجة لا يعمل سوى نصف كل قوة شد عموديًا لدعم المصباح. ، وهذا معقول لأن كل كابلين مائل، ولا يدعم إلا جزءًا من الوزن.
فسِّرها بنفسك:	لماذا يكون الشد في كل كبل أكبر من نصف وزن المصباح، رغم أن الكابلين يدعمان الحمل بالتساوي؟

نصيحة امتحانية:

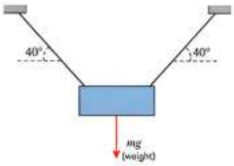
بالنسبة لجسم في اتزان مدعوم بكابلين، حلِّل كلتا قوتَي الشد.

تُلغي إحدى مركبتيهما الأفقيتين، وتتجمع مركبتاهما الرأسيتان لتوازنا الوزن.

جرِّب بنفسك: يتدلى المصباح نفسه الذي كتلته 6.0 kg بواسطة كابلين متطابقين، يصنع كل منهما زاوية 50° مع الأفقي. أوجد الشد في كل كابلين (بالنيوتن)، وقارنه بالقيمة التي حصلت عليها في المثال السابق.



شكل (6.5.1)

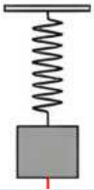


شكل (7.5.1)

حاول:

(أ) يتدلى مصباح شارع فوق ساحة عامة من كابلين يصنعان زاويتين 30° و60° مع الأفقي. كتلة المصباح 20 kg. أوجد الشد في كل كابلين بالنيوتن، واذكر أي الكابلين يحمل الشد الأكبر.

(ب) تتدلى لافتة كتلتها 5.0 kg فوق شارع من كابلين يصنع كل منهما زاوية 40° مع الأفقي. أوجد الشد في كل كابلين بالنيوتن.

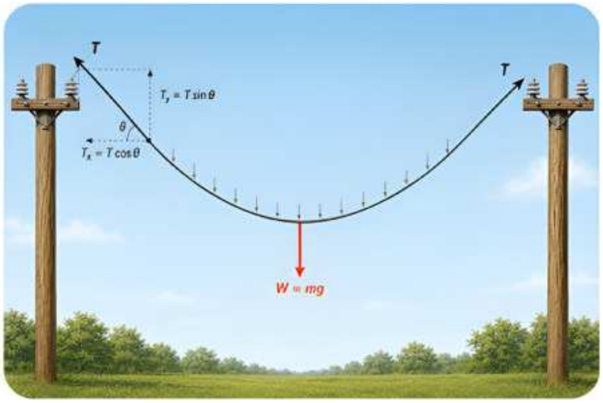


(جـ) تتدلى قطعة معدنية في حالة سكون من نابض زنبرك مقدار الثابت له $200\ \text{N m}^{-1}$، فيستطيل 0.15 m. أوجد وزن القطعة بالنيوتن.

في سياق جديد — خطوط الكهرباء بين الأعمدة

سؤال للربط:
كيف تُطبَّق مفاهيم الاتزان والحفظ لفهم المادة والحركة من أصغر ذرة إلى الكون بأسره؟

أثناء السفر على طريق ريفي، قد تلاحظ أن خطوط الكهرباء تتدلى بين الأعمدة بدلًا من أن تكوِّن خطًا أفقيًا مستقيمًا. وينطبق مبدأ الاتزان نفسه على حمل مدعوم (مثبت) بكابلين. ويتوزع الجزء الممتد من السلك بين العمودين بشكل مستمر على طول السلك. وعند نقطتَي التثبيت، المركبتان الرأسيتان لقوتي الشد معًا تعادل (تساوى) الوزن الكلى للكابلين، بينما تتساوى المركبتان الأفقيتان في المقدار وتتعاكسان في الاتجاه. ومع تناقص التدلي، يصبح السلك أقرب إلى الأفقي عند نقطتى الدعم (التثبيت). وعندئذٍ تصبح المركبة الرأسية جزءًا أصغر من قوة الشد، لذا يلزم شد أكبر بكثير لدعم الوزن نفسه. وفي الحالة المثالية لسلك أفقي تمامًا يدعم وزنًا غير صفري، يميل الشد المطلوب إلى ما لا نهاية. لذا تُركَّب خطوط الكهرباء بمقدار محسوب من التدلى (الانحناء فى السلك).

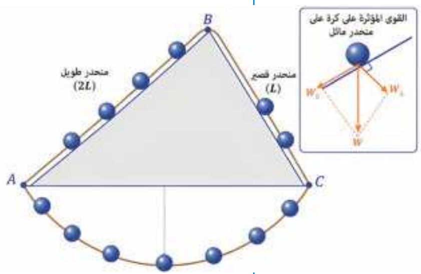


شكل (8.5.1)

دورك الآن: باستخدام المركبات الرأسية، فسِّر لماذا يؤدي تقليل التدلي في خط كهرباء إلى زيادة الشد فيه.

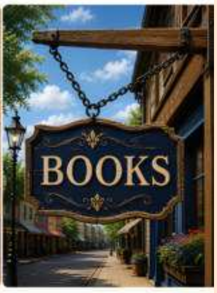
طبيعة العلم: النماذج — قانون اتزان مبكر قبل نيوتن

قبل أن يصوغ نيوتن قوانين الحركة، درس سيمون ستيفن (١٥٨٦) الاتزان على المستويات المائلة باستخدام تجربة فكرية عُرفت بـ «إكليل الكرات». فقد تخيَّل سلسلة مغلقة من كرات متساوية عن بعضهما موضوعة حول مستويين مائلين. وإذا أحدث أحد الجانبين أثرًا دورانيًا أكبر من الآخر، لتحركت السلسلة باستمرار مع عودتها إلى الترتيب نفسه، منتجة حركة دائمة. واستنتج ستيفن أن الأثرين على المنحدرين يجب أن يتزنا. وساعدت هذه الفكرة على إرساء قانون الاتزان على المستوى المائل، ومبادئ تحليل القوى إلى مركبات.



شكل (9.5.1)

دورك الآن: لماذا استطاع ستيفن أن يثق بهذا الاستنتاج حتى بدون معادلات الحركة الحديثة؟



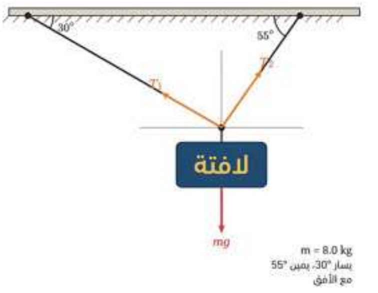
سؤال الدرس، وإجابته:

يبقى كتاب في حالة سكون على طاولة، وتُعلَّق لافتة متجر بسلسلتين – ما الصحيح بشأن القوة المحصلة المؤثرة في كل جسم؟ في كلتا الحالتين، يكون الجسمان في اتزان انتقالي، لذا يكون المجموع الجبرى الاتجاهي لجميع القوى المؤثرة في كل جسم صفرًا: $\Sigma F = 0$. فبالنسبة للكتاب، توازن قوة رد الفعل العمودية إلى أعلى وزنه. أما بالنسبة للافتة، فتُلغي إحدى المركبتين الأفقيتين لقوتَي الشد الأخرى، بينما توازن مركبتاهما الرأسيتان معًا وزن اللافتة. ولأن السلسلتين تصنعان زاويتين مختلفتين مع الأفقي، يكون الشدّان غير متساويين عمومًا، وتحمل السلسلة الأكثر انحدارًا الشد الأكبر.

تمرين:

احسب النتيجة إلى أقرب رقمين عشريين؛ خذ $g = 9.8\ \mathrm{m\ s^{-2}}$.

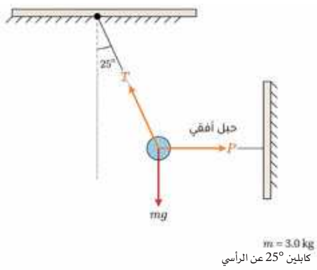
(أ) تتدلى لافتة متجر كتلتها 8.0 kg في حالة اتزان من كابلين خفيفين متصلين بعارضة أفقية. يصنع الكابلين الأيسر زاوية 30° مع الأفقي، ويصنع الكابلين الأيمن زاوية 55° مع الأفقي.
أوجد الشد في كل كابلين بالنيوتن، واذكر أي الكابلين يتاثر الشد الأكبر.



كبلان بزوايا مختلفة – تحليل T_1 و T_2.

شكل (10.5.1)

(ب) يُثبَّت مصباح كتلته 3.0 kg في حالة اتزان بكابلين خفيف مثبَّت في السقف وحبل أفقي خفيف. يصنع الكابلين زاوية 25° مع الرأسي.
أوجد (i) الشد T في الكابلين، (ii) الشد P في الحبل الأفقي، كليهما بالنيوتن.



ثلاث قوى تؤثر على المصباح —— توازن المركبات على طول المحورين x و y.

شكل (11.5.1)

(جـ) تتدلى قطعة كتلتها 1.5 kg في حالة اتزان من نابضين خفيفين متطابقين. يصنع كل نابض زاوية 40° مع الرأسي وثابته $60\ \mathrm{N\ m^{-1}}$.
أوجد (i) القوة في كل نابض بالنيوتن، (ii) استطالة كل نابض بالمتر.

سؤال بأسلوب الامتحان:

يتدلى مصباح كتلته 6.0 kg في حالة سكون من كابلين يصنعان زاويتين متساويتين مقدارهما 40° مع الأفقي. ارسم مخطط الجسم الحر للمصباح، ثم أوجد الشد في كل كابلين.

الدرس ١-٦ — القدرة والكفاءة

؟ سؤال الدرس:
يرفع مصعدان نفس الحمولة إلى الارتفاع الرأسي نفسه، لكن أحدهما ينهي الرفع في نصف الزمن. هل يبذل المصعدان الشغل المفيد نفسه؟ وأيهما له القدرة الأكبر؟

ستتعلم أن

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

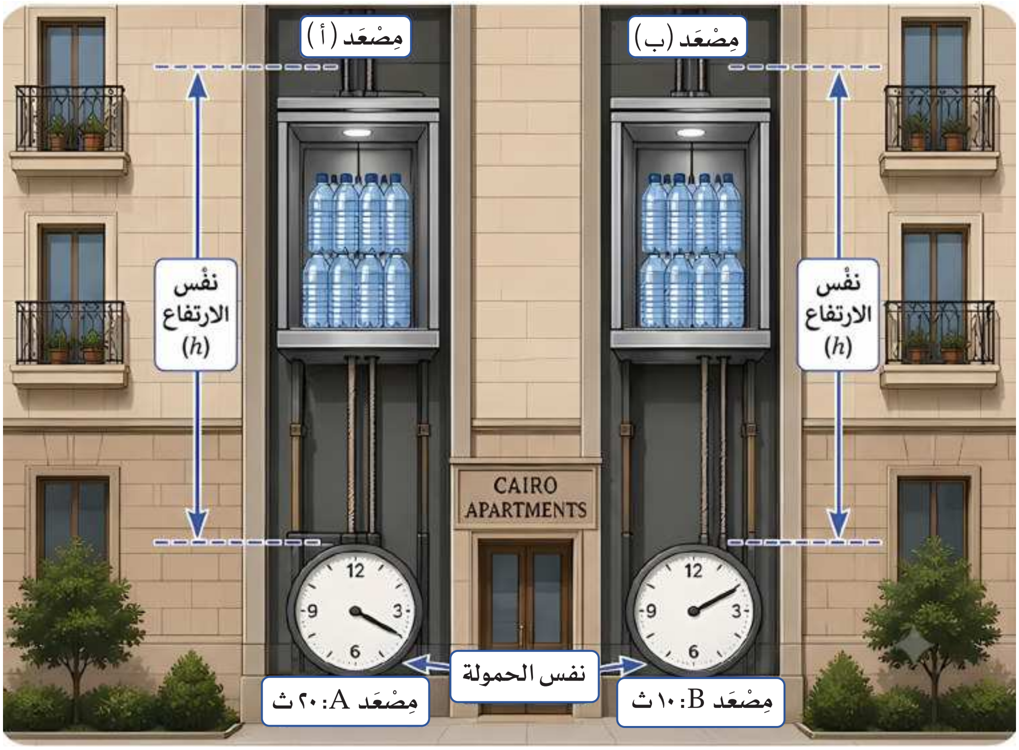
١. **تحسب** قدرة آلة بدلالة الشغل المبذول والزمن المستغرق، أو من القوة والسرعة الثابتة.

٢. **تحدد** كفاءة جهاز بدلالة طاقة الخرج المفيدة وإجمالي طاقة الدخل، معبرًا عنها كنسبة مئوية.

٣. **تفسر** انتقال الطاقة في مخطط سانكي وتحدد أين تتبدد الطاقة المهدرة (المفقودة).

حقيقة أساسية:
الشغل: $W = Fd\cos\theta$، لا تبذل القوة شغلًا إلا عندما تُحدث إزاحة في اتجاه القوة أو مركبتها على طول الإزاحة.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر



شكل (1.6.1)

يرتفع مصعدان جنبًا إلى جنب في مبنى واحد. يحمل كل منهما الحمل نفسه إلى الطابق نفسه – أي الارتفاع نفسه. يستغرق المصعد (أ) زمن 20 s؛ ويقوم المصعد (ب) بذلك في 10 s، أي في نصف الزمن. يقول بعض الناس أحيانًا إن المصعد الأسرع «يبذل شغلًا أكبر». وقبل أن تكمل، اكتب توقعك: هل يبذل المصعدان الشغل المفيد نفسه؟ وأيهما له القدرة الأكبر؟

توقَّع قبل أن تستمر:

(أ) هل بذل المصعد الأسرع شغلًا مفيدًا أكبر على الحمل، أم بذل المصعدان الشغل المفيد نفسه؟

(ب) يدَّعي بائع أن: «المحرك الأكثر قدرة يستهلك طاقة كهربائية أقل». هل يمكن أن يكون هذا صحيحًا؟

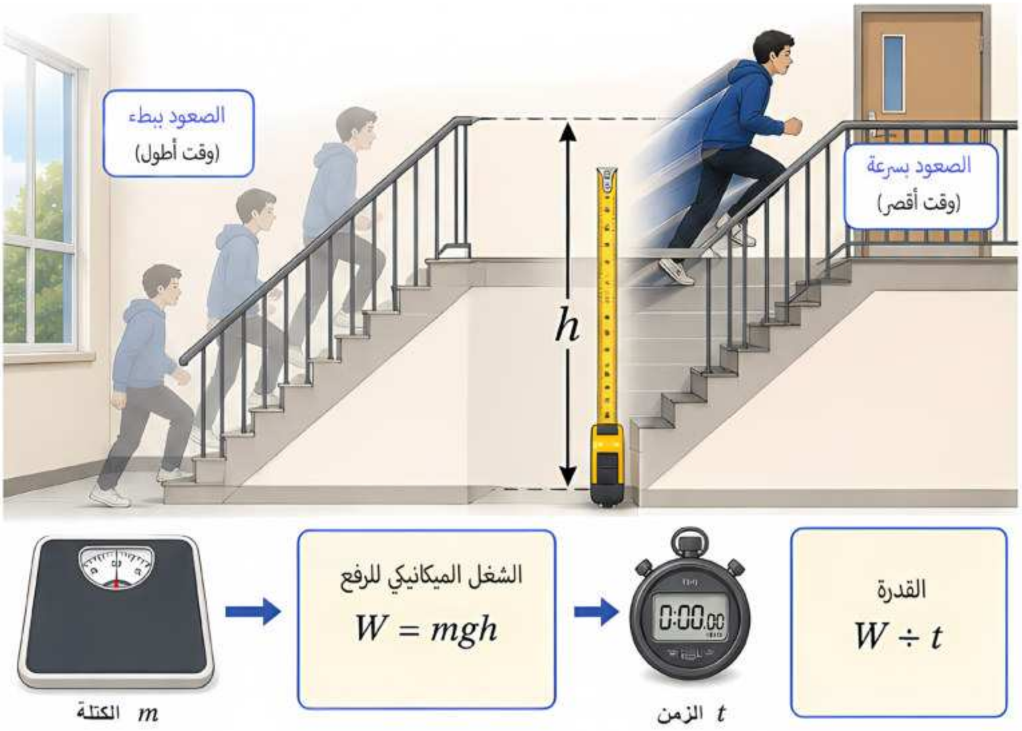
استكشف — اصعد درج المدرسة

ما ستفعله: تستخدم ميزانًا وساعة توقيت لقياس القدرة الناتجة أثناء صعود الدرج.

الزمن: 12 دقيقة

ما تحتاجه:

- ميزان رقمي
- ساعة توقيت أو مؤقت هاتف
- شريط قياس


الصعود ببطء
(وقت أطول)
الصعود بسرعة
(وقت أقصر)
h
الكتلة m
الشغل الميكانيكي للرفع
W = mgh
0:00.00
الزمن t
القدرة
W ÷ t

شكل (2.6.1)

الخطوات:

١ قِس كتلتك (m) على الميزان وسجِّلها بالكيلوجرام.

٢ قِس الارتفاع الرأسي h لدرجة سلم واحدة، بالمتر — قِس الارتفاع الرأسي، لا طول الدرج.

٣ احسب الشغل المبذول في رفع نفسك: W = mgh، بافتراض $g = 9.8\ \mathrm{m\ s^{-2}}$.

٤ اصعد الدرج ببطء بينما يقيس زميلك الزمن. سجِّل النتيجة.

٥ كرر الصعود بأسرع ما يمكن بأمان، وسجِّل الزمن الأقصر.

الصعود	الزمن	الشغل المبذول = mgh	الشغل ÷ الزمن
ببطء			
بسرعة			

حلِّل ما جمعته:

(أ) هل تغيَّر الشغل الذي بذلته بين الصعودين، أم بقي ثابتًا؟ فسِّر إجابتك.

(ب) في أي صعود كانت قيمة (W/t) أكبر؟ وماذا تمثِّل هذه الكمية؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

ملاحظة القياس:

قِس زمن كل صعود مرتين وخذ القيمة المتوسطة. يمكن أن يُدخل زمن رد فعل الإنسان عند بدء ساعة التوقيت وإيقافها عدم يقين مقداره بضعة أعشار من الثانية. ولهذا عدم اليقين أثر مئوي أكبر على الصعود الأسرع لأن زمنه المقاس أقصر.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشـاط الاستكشـاف، بذلت مقدار الشـغل نفسـه في كلا الصعودين — إذ كانت كتلتك والارتفاع الرأسي ثابتين، فتظل $(W = mgh)$ دون تغيير. ومع ذلك، فإن عملية الصعود الأسرع أنجزت هذا العمل في وقت أقل، وبالتالي أسفرت عن قيمة أكبر لـ (W/t). وتسمى هذه الكمية «القدرة المتوسطة».

القدرة — مدى سرعة أداء الشغل:

يمكن لآلتين أن تؤديا مقدار الشغل نفسه أو تنقلا مقدار الطاقة نفسه، لكن في زمنين مختلفين. وتقيس القدرة هذا الفرق: فهي معدل أداء الشغل أو نقل الطاقة.

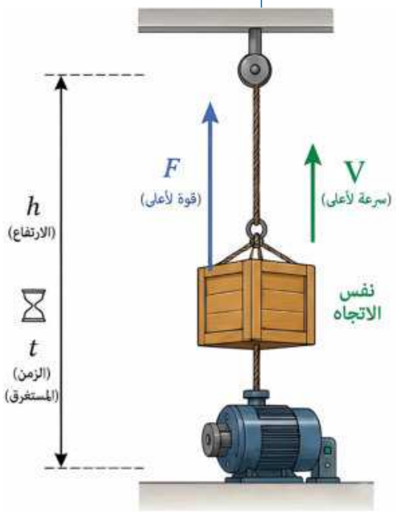
والقدرة المتوسطة خلال فترة زمنية هي: $P = \Delta W/\Delta t$، حيث ΔW هو الشغل المبذول خلال تلك الفترة.

وحدة القدرة هي الواط: $1\,W = 1\,J\,s^{-1}$

ويُعبَّر عن القيم الأكبر للقدرة عادةً بالكيلوواط والميجاواط:

$1\,kW = 10^3\,W$ ، $1\,MW = 10^6\,W$

ويمكن أيضًا ربط القدرة بالقوة F والسرعة. فإذا أثرت قوة في اتجاه الحركة: $P = Fv$



شكل (3.6.1)

نقطة

! يُحسب الشغل (W) الذي تبذله قوة ثابتة (F) [بوحدة نيوتن] لتحريك جسم مسافة إزاحة (s) [بوحدة متر] وبزاوية (θ) بالنسبة لاتجاه القوة، بالمعادلة: $W = Fs\cos\theta$. يمكن لآلتين إنجاز نفس القدر من الشغل ولكن في فترات زمنية مختلفة؛ ويُطلق على معدل إنجاز الشغل اسم "القدرة المتوسطة" (P)، وتُحسب –عند إنجاز شغل مقداره ΔW [بوحدة جول] خلال زمن Δt [بوحدة ثانية]– بالمعادلة: $P = \Delta W/\Delta t$، وتُقاس بوحدة الواط (W).

! عندما تؤثر قوة (F) على جسم يتحرك بسرعة (v) [بوحدة متر/ثانية]، يمكن التعبير عن القدرة دون الحاجة لقياس الزمن بالمعادلة: $P = Fv\cos\theta$.

! تُعرف النسبة المئوية للطاقة الداخلة التي تخرج من الجهاز كطاقة مفيدة (مخرجات مفيدة) باسم "الكفاءة". وهي كمية بلا أبعاد، يُعبّر عنها بقيمة عشرية تتراوح بين 0 و1 أو كنسبة مئوية.

لا يوجد جهاز حقيقي كفاءته 100%؛ إذ يُفقد دائمًا جزء من الطاقة الداخلة وينتقل إلى الوسط المحيط كطاقة مهدرة.

يوضح "مخطط سانكي" (Sankey diagram) هذا الأمر بصرياً؛ حيث يتفرع سهم الطاقة الداخلة إلى مسارين: أحدهما يمثل الطاقة المفيدة الخارجة والآخر يمثل الطاقة المهدرة، وتتناسب مساحة كل سهم مع مقدار الطاقة التي يحملها.

تطبيق سريع:

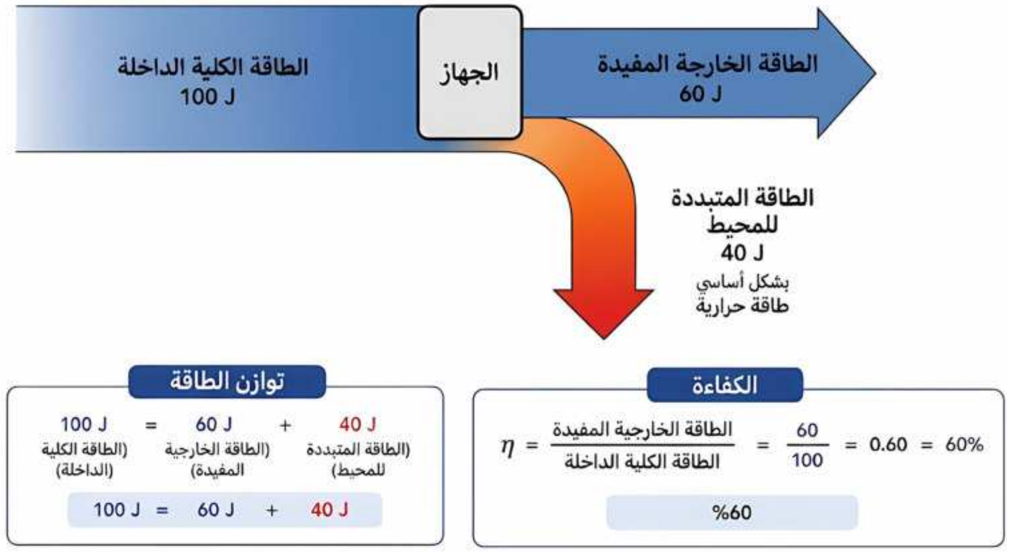
يحمل مصعد مكتبي حمولته إلى أعلى بسرعة ثابتة $2.5\,m\,s^{-1}$ ويؤثر المحرك إلى أعلى بقوة 7840N

صندوق المعادلات:

الشغل:	$W = Fd\cos\theta$
القدرة، من الشغل والزمن:	$P = \Delta W/\Delta t$
القدرة، من القوة والسرعة:	$P = Fv\cos\theta$

الكفاءة كمية بلا أبعاد، يُعبَّر عنها بصورة عشرية (بين 0 و1) أو كنسبة مئوية. ولا يوجد جهاز حقيقي كفاءته 100% لأن بعض طاقة الدخل تُفقَد دائمًا إلى المحيط.

يمثِّل مخطط سانكي انتقالات الطاقة بصريًّا: ينقسم سهم دخل واحد إلى مسارَي خرج مفيد وطاقة مهدرة، بحيث يتناسب عرض كل سهم مع الطاقة التي يمثِّلها. وتُفسَّر مخططات سانكي بمقارنة العروض النسبية للأسهم بدلًا من حفظ القيم.

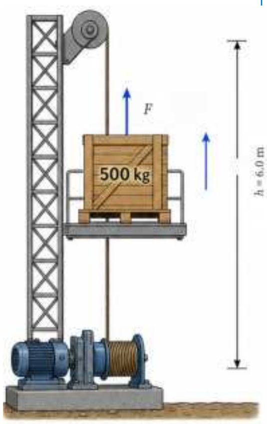

الطاقة الكلية الداخلة
100 J
الجهاز
الطاقة الخارجة المفيدة
60 J
الطاقة المتبددة للمحيط
40 J
بشكل أساسي طاقة حرارية
الكفاءة
$\eta = \frac{\text{الطاقة الخارجية المفيدة}}{\text{الطاقة الكلية الداخلة}} = \frac{60}{100} = 0.60 = 60\%$
%60
توازن الطاقة
100 J = 60 J + 40 J
(الطاقة الكلية (الداخلة)
(الطاقة الخارجية (المفيدة)
(الطاقة المتبددة (للمحيط)
100 J = 60 J + 40 J

شكل (4.6.1)

صندوق المعادلات:

الكفاءة:	η = طاقة الخرج المفيدة ÷ إجمالي طاقة الدخل

مثال محلول:


F
500 kg
h = 6.0 m

شكل (5.6.1)

الموقف:	ترفع رافعة في موقع بناء منصة نقالة كتلتها 5.0×10^2 kg رأسيًّا إلى أعلى بارتفاع 6.0 m بسرعة ثابتة خلال 12 s. أهمل مقاومة الهواء. أوجد: (أ) الشغل الذي بذلته الرافعة بالجول. (ب) القدرة المتوسطة التي تنتجها الرافعة. (جـ) تحقق باستخدام P = Fv.
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** m = 500 kg، h = 6.0 m، t = 12 s، g = 9.8 m s^{-2}. **المطلوب:** (أ) الشغل W، (ب) القدرة P، (جـ) التحقق باستخدام P = Fv.
التمثيل:	مصعد (أسانسير) رأسي بسرعة ثابتة F = mg.
الاستراتيجية:	1) Use W = mgh 2) Use P = W / t 3) Find speed v = h / t and check using P = mgv

حقيقة أساسية:

مصعد رأسي بسرعة ثابتة:

P = Fv = mgv = mgh / t

استخدم P = Fv عندما تُعطى السرعة، أو

P = mgh / t

عندما يُعطى الارتفاع والزمن.

الحل الموضح:	(أ) $W = 500 \times 9.8 \times 6.0 = 2.94 \times 10^4\ \text{J}$ (ب) $P = (2.94 \times 10^4) / 12 = 2.45 \times 10^3\ \text{W} = 2.45\ \text{kW}$ (جـ) $v = 6.0 / 12 = 0.5\ \text{m s}^{-1}$ $P = mgv = 500 \times 9.8 \times 0.5 = 2450\ \text{W} = 2.45\ \text{kW}$
منطقية الحل:	تُعطي الطريقتان القيمة الموجبة نفسها للقدرة، مما يؤكد صحة الحساب.
فسِّرها بنفسك:	إذا رفعت الرافعة الحمل نفسه لكن في نصف الزمن، كيف يؤثر ذلك في القدرة؟ ولماذا؟

جرِّب بنفسك: ترتفع مقصورة مصعد كتلتها $400\ \text{kg}$ رأسيًّا بارتفاع $9.0\ \text{m}$ بسرعة ثابتة خلال $15\ \text{s}$. خذ $g = 9.8\ \text{m s}^{-2}$. **احسب** القدرة الناتجة عن محركها بالكيلوواط، ثم **تحقق** من إجابتك باستخدام $P = Fv$.

الكفاءة — ما نسبة طاقة الدخل المنقولة بصورة مفيدة؟

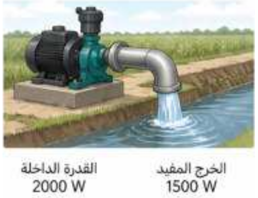
لا ينقل أي جهاز كل الطاقة الداخلة إلى طاقة خرج مفيدة؛ إذ تفقد دائمًا بعض الطاقة، عادةً في صورة طاقة حرارية. وتقيس الكفاءة جزء الطاقة الداخلة التي تحولت إلى طاقة الخرج المفيدة:

η = طاقة الخرج المفيدة ÷ إجمالي طاقة الدخل.

حاول:

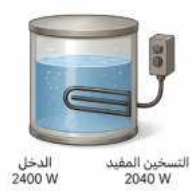
اذكر كل كفاءة كنسبة مئوية.

(أ) تسحب مضخة كهربائية في مزرعة بدلتا النيل قدرة كهربائية مقدارها $2000\ \text{W}$، وتُنتج قدرة خرج مفيدة مقدارها $1500\ \text{W}$ لرفع مياه الري. أوجد كفاءة المضخة.



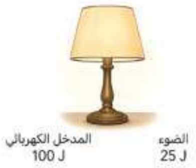
شكل (6.6.1)

(ب) تستقبل سخانة مياه كهربائية صغيرة $2400\ \text{W}$، وتُنتج قدرة حرارية مفيدة مقدارها $2040\ \text{W}$ للماء. أوجد كفاءتها.



شكل (7.6.1)

(جـ) يُزوَّد مصباح بطاقة كهربائية مقدارها $100\ \text{J}$. ويُصدر $25\ \text{J}$ من الضوء، ويتبدد الباقي كحرارة. أوجد الطاقة المهدرة (المفقودة) كحرارة وكفاءة المصباح.



شكل (8.6.1)

(د) ارسم مخطط سانكي بسيطًا للمصباح في (جـ): ارسم سهم دخل واحدًا يمثِّل $100\ \text{J}$، ينقسم إلى خرج ضوئي مفيد وخرج حراري مفقود. اجعل عروض الأسهم متناسبة مع الطاقات التي تمثِّلها.

حقيقة أساسية:

قراءة مخطط سانكي:

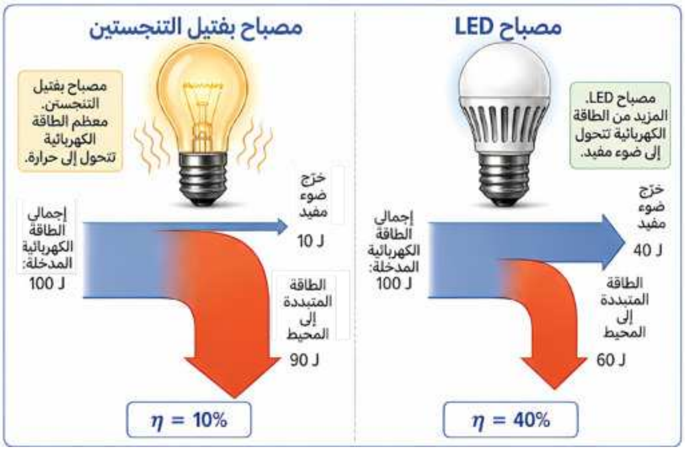
يساوي إجمالي الدخل مجموع الخرج المفيد وجميع الخرج المهدر. لذا يمكن حساب خرج مفقود بطرح مجموع الخرج المعروف من إجمالي الدخل.

في سياق جديد — اختيار مصباح كفء

يمكن أن يؤدي استبدال مصباح فتيلي تقليدي بمصباح LED إلى تقليل الطاقة الكهربائية اللازمة لإضاءة غرفة. فمقابل كل 100 J من الطاقة الكهربائية المزوَّدة، قد ينقل المصباح الفتيلي نحو 10 J فقط كضوء مفيد. ويتبدد الباقي البالغ 90 J إلى المحيط، غالبًا كطاقة حرارية. أما مصباح LED فقد ينقل نحو 40 J من دخل الـ 100 J نفسه كضوء مفيد، بينما يتبدد نحو 60 J إلى المحيط. لذا يكون مصباح LED أكفأ لأن نسبة أكبر من طاقة دخله تُنقَل كضوء مفيد. ويوضح مخطط سانكي هذا الفرق: فسهم الضوء المفيد لمصباح LED أعرض، وسهم الطاقة المهدرة أضيق، مقارنة بالمصباح الفتيلي، رغم أن كليهما يستقبل الدخل نفسه البالغ 100 J.

نصيحة امتحانية:

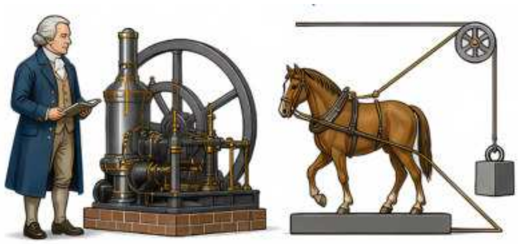
اذكر الكفاءة كنسبة مئوية فقط عندما يطلب السؤال ذلك. يمكن كتابة الكفاءة كعدد عشري أو نسبة مئوية.


مصباح LED
مصباح بفتيل التنجستين
مصباح LED. المزيد من الطاقة الكهربائية تتحول إلى ضوء مفيد.
مصباح بفتيل التنجستن. معظم الطاقة الكهربائية تتحول إلى حرارة.
خرج ضوء مفيد
40 J
إجمالي الطاقة الكهربائية المدخلة: 100 J
الطاقة المتبددة إلى المحيط
60 J
خرج ضوء مفيد
10 J
إجمالي الطاقة الكهربائية المدخلة: 100 J
الطاقة المتبددة إلى المحيط
90 J
η = 40%
η = 10%

شكل (9.6.1)

دورك الآن: فسِّر، من مخططَي سانكي، لماذا يكلِّف تشغيل مصباح LED أقل من مصباح فتيل التنجستين بينما يُنتجان مقدار الضوء المفيد نفسه.

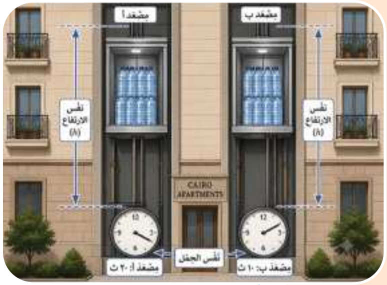
طبيعة العلم: أرشميدس والرافعة — قانون الميكانيكا المبكر



شكل (10.6.1)

عندما سوَّق جيمس وات محركاته البخارية المحسَّنة في أواخر القرن الثامن عشر، احتاج الزبائن إلى طريقة مألوفة لمقارنة قدرتها بقدرة الخيول العاملة. استخدم واط تقديرًا لقدرة حصان عامل كأساس للمقارنة. وعرَّف الحصان الواحد بأنه معدل أداء شغل مقداره 33000 قدم – رطل في الدقيقة. وسمح ذلك بالتعبير عن قدرة المحرك بمصطلحات يمكن للزبائن فهمها ومقارنتها. ويُظهر هذا المثال كيف يمكن استخدام القياسات وتعريف متفق عليه لإرساء وحدة عملية للتعبير عن كمية فيزيائية.

دورك الآن: اقترح ميزة واحدة للتعبير عن قدرة المحرك بوحدة الحصان بدلًا من استحداث وحدة جديدة تمامًا.


مصعد ب
مصعد أ
نفس الارتفاع (h)
نفس الارتفاع (h)
CAIRO APARTMENTS
مصعد ب: ١٠ ث
نفس الحمل
مصعد أ: ٢٠ ث

شكل (11.6.1)

سؤال الدرس، وإجابته:

يرفع مصعدان الحمل نفسه إلى الارتفاع الرأسي نفسه، لكن أحدهما ينهي الرفع في نصف الزمن. هل يبذل المصعدان الشغل المفيد نفسه؟ وأيهما له القدرة الأكبر؟

يبذل المصعدان الشغل المفيد نفسه لأن الحمل نفسه يُرفع إلى نفس الارتفاع الرأسي ($W = mgh$).

أما المصعد الذي ينهي الحركة في زمن أقل فله القدرة الأكبر ($P = W/t$).

وإذا اختلفت طاقتا دخلهما، فإن المصعد الأكفأ هو الذي يحوِّل جزءًا كبيرًا من الطاقة الداخلة إلى طاقة مفيدة ويبدد طاقة أقل إلى المحيط. لذا سيُظهر مخطط سانكي سهم خرج مفيد أعرض وسهم طاقة مهدرة أضيق للمصعد الأكفأ.

تمرين:

(١) يرفع مصعد بضائع حملًا كتلته 1.5×10^3 kg رأسيًا بارتفاع 18 m بسرعة ثابتة، مستغرقًا 30 s.

(أ) احسب الشغل الذي بذله المصعد على الحمل.

(ب) أوجد القدرة الناتجة عن المصعد بالكيلوواط.

(جـ) بيِّن أن السرعة الثابتة للحمل تساوي $0.60\ \text{m s}^{-1}$.

(د) باستخدام $P = Fv$، تحقق من إجابتك في (ب)، وفسِّر بإيجاز لماذا يجب أن تُعطي الطريقتان النتيجة نفسها.

(٢) يرفع كل من المصعدين A وB حملًا كتلته 600 kg إلى الارتفاع الرأسي نفسه 9.0 m بسرعة ثابتة. ينهي المصعد A الرفع في 24 s؛ وينهي المصعد B الرفع نفسه في 12 s.

(أ) فسِّر لماذا يبذل المصعدان الشغل المفيد نفسه على الحمل، واذكر قيمته.

(ب) احسب القدرة الناتجة عن المصعد A وعن المصعد B بالكيلوواط.

(جـ) اذكر النسبة $P^B : P^A$ وبيِّن كيف ترتبط بنسبة الأزمنة المستغرقة.

(٣) يُزوَّد ونش كهربائي بطاقة كهربائية مقدارها 5.0×10^4 J. ويبذل 3.5×10^4 J من الشغل المفيد في رفع حمل؛ وتتبدد بقية الطاقة.

(أ) احسب الطاقة المتبددة (المفقودة) بواسطة الونش.

(ب) أوجد كفاءة الونش، معبِّرًا عنها كنسبة مئوية.

(جـ) ارسم مخطط سانكي لانتقال الطاقة هذا، بحيث يتناسب عرض كل سهم مع الطاقة التي يمثِّلها.

(د) اذكر الصورة الرئيسية للطاقة التي تتحول إليها الطاقة المتبددة.

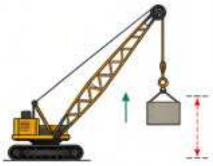
(٤) ترفع رافعة كهربائية حملًا كتلته 250 kg بارتفاع رأسي 6.0 m بسرعة ثابتة خلال 8.0 s. وأثناء ذلك، تُزوَّد الرافعة بطاقة كهربائية بمعدل ثابت مقداره 2.5 kW.

(أ) احسب القدرة المفيدة الناتجة عن الرافعة بالكيلوواط.

(ب) أوجد كفاءة الرافعة، معبِّرًا عنها كنسبة مئوية.

سؤال بأسلوب الامتحان:

ترفع رافعة صغيرة حملًا كتلته 600 kg رأسيًا بارتفاع 8.0 m بسرعة ثابتة خلال 16 s. خذ $g = 9.8\ \text{m s}^{-2}$. احسب الشغل الذي بذلته الرافعة على الحمل، والقدرة الميكانيكية الناتجة عن الرافعة بالكيلوواط.



شكل (12.6.1)

الدرس ١-٧ — كمية التحرك والدفع

؟ سؤال الدرس:
لماذا يقل احتمال تحطم هاتف عند سقوطه على سرير مقارنة بسقوطه على أرضية من البلاط، حتى لو سقط من الارتفاع نفسه؟

ستتعلم أن

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

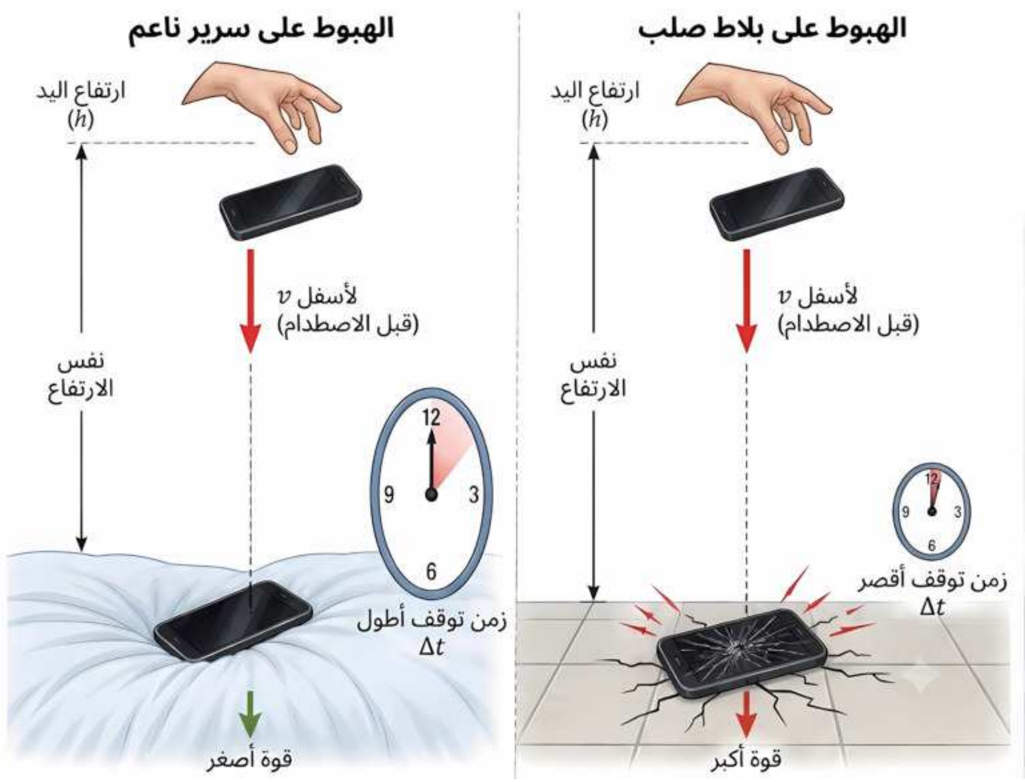
١. **تصف** كمية التحرك بوصفها حاصل ضرب الكتلة في السرعة، p = mv.

٢. **تحدد** دفع قوة وتربطه بالتغيُّر في كمية التحرك، J = FΔt = Δp.

٣. **تفسر** لماذا يؤدي زيادة الزمن الذي يستغرقه تغيُّر كمية التحرك إلى نقصان القوة المحصلة المتوسطة.

★ حقيقة أساسية:
كمية التحرك والدفع كميتان متجهتان، وتُستخدم علاقتان أساسيتان في هذا الدرس: (p = mv) و(J = FΔt).

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر



الهبوط على بلاط صلب
الهبوط على سرير ناعم
ارتفاع اليد (h)
ارتفاع اليد (h)
v لأسفل (قبل الاصطدام)
v لأسفل (قبل الاصطدام)
نفس الارتفاع
نفس الارتفاع
12
3
6
9
زمن توقف أقصر Δt
زمن توقف أطول Δt
قوة أكبر
قوة أصغر

شكل (2.7.1)

يسقط هاتف من الارتفاع نفسه على سطحين مختلفين. فيهبط على سرير، ويرتد قليلًا، ويبقى سليمًا. ثم يهبط على أرضية من البلاط من الارتفاع نفسه، فتتهشم الشاشة. وفي كلتا الحالتين، يصل الهاتف إلى السطح بالكتلة والسرعة نفسيهما، لذا يكون التغيُّر في كمية التحرك نفسه. ويكمن الفرق في التفاعل أثناء الارتطام، لا في السقوط نفسه.

توقَّع قبل أن تستمر:

(أ) ماذا يغيِّر السرير: التغيُّر في كمية التحرك، أم زمن التوقف، أم كلاهما؟

(ب) هل تتعرض كرة ترتد عن جدار لقوة أكبر أم أصغر أم نفس القوة التي تتعرض لها كرة تلتصق بالجدار، لنفس السرعة الابتدائية وزمن التفاعل؟

استكشف — اختبار نظرية الدفع وكمية التحرك

ما ستفعله: تقيس الدفع المؤثر أثناء التصادم والتغيُّر في كمية التحرك الذي يُحدثه، ثم تستقصي العلاقة بينهما.

الزمن: 40 دقيقة.

ما تحتاجه:

- عربة ديناميكية ومسار أفقي.
- مستشعر قوة مثبَّت في أحد طرفَي المسار، مزوَّد بمصدٍّ نابضي.
- مستشعر حركة (أو عربة ذات مُرمِّز حركة) لقياس سرعة العربة.
- مسجِّل بيانات أو حاسوب ببرنامج رسم بياني.
- ميزان.

الخطوات:

١ قِس الكتلة الكلية m للعربة. ثبِّت مستشعر القوة ومصدَّه النابضي عند أحد طرفَي مسار أفقي، مع مستشعر الحركة عند الطرف الآخر.

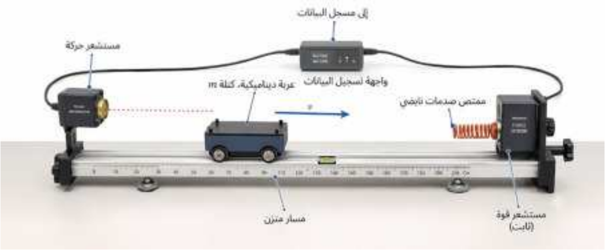
٢ صفِّر مستشعر القوة دون أي قوة عليه. اضبط البرنامج لرسم القوة والسرعة مقابل محور الزمن نفسه.

٣ ادفع العربة بحيث تتحرك بسرعة شبه ثابتة قبل أن تصطدم بالمصدّ وترتد؛ وأبعد يدك أثناء التصادم.

٤ من مخطط السرعة–الزمن، اقرأ السرعة في الأجزاء ذات السرعة الثابتة قُبيل التصادم (v_i) وبعده مباشرة (v_f). وباعتبار الاتجاه الابتدائي موجبًا، تصبح vf سالبة، إذن $\Delta p = m(v_f - v_i)$.

٥ من مخطط القوة–الزمن، حدِّد الدفع J بوصفه المساحة أسفل النبضة، وسجِّل القوة القصوى وزمن التماس Δt.

٦ كرر التجربة مرتين إضافيتين: أولًا بالمصدِّ نفسه بسرعة اصطدام أعلى، ثم بمصدٍّ أكثر مرونة بسرعة اصطدام شبه مساوية لتلك في المحاولة 1.



شكل (2.7.1)

المحاولة	$v_i\,(ms^{-1})$	$v_f\,(ms^{-1})$	$\Delta t(s)$	$\Delta p = m\,(v_f - v_i)\,(N\,s)$	الدفع $J\,(Ns)$
١. كتل متماثلة					
٢. أثقل – أخف					
٣. (مصدٌّ أملس ناعم)					

حلِّل ما جمعته:

(أ) لكل محاولة، قارن الدفع J (المساحة أسفل مخطط القوة–الزمن) بالتغيُّر في كمية التحرك $\Delta p = m(v_f - v_i)$. هل يتساويان في المقدار ضمن عدم اليقين (الخطأ) التجريبي؟ يختبر هذا نظرية الدفع وكمية التحرك.

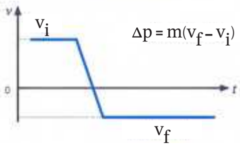
(ب) يزيد المصدُّ الأكثر ليونة زمن التلامس (زمن التأثير). بالنسبة لتغيُّر مماثل في كمية التحرك، فسِّر كيف يؤثر ذلك في القوة أثناء التصادم.

اكتب، في سطرين، لماذا يجب أن تساوي المساحة أسفل مخطط القوة – الزمن لديك القيمة $\Delta p = m\,(v_f - v_i)$، قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

ملاحظة القياس:

اقرأ v_i وv_f من الأجزاء المستوية (ثابتة السرعة) في مخطط السرعة–الزمن، قُبيل التصادم وبعده مباشرة — لا أثناءه أبدًا. أوجد الدفع من المساحة أسفل نبضة القوة فقط، وأعد تصفير مستشعر القوة قبل كل محاولة.

العلاقة البيانية (سرعة – زمن)



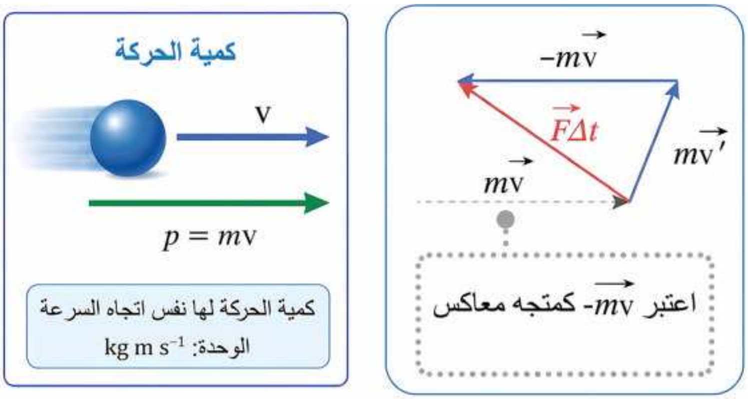
شكل (3.7.1)

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، عند مقارنة المحاولتين 1 و3، كانت للعربة الكتلة نفسها وسرعة اصطدام متقاربة تقريبًا. ومع ذلك، أثَّر المصدُّ الأكثرليونة بقوة متوسطة أصغرعبرزمن أطول، بينما أثَّر المصدُّ الأكثرصلابة بقوة متوسطة أكبرعبر زمن أقصر. ولعلك توقعت أن المصدَّ الأكثرليونة يقلل التغيُّرفي كمية تحرك العربة. لكن هذا غيرصحيح؛ فللسرعة الابتدائية نفسها وسرعة الارتداد نفسها، يكون التغيُّرفي كمية التحرك نفسه؛ والذي يختلف هو زمن التفاعل، وبالتالي متوسط القوة. وفيما يلي النموذج الذي تشيرإليه أدلتك.

كمية التحرك والدفع

لجسم كتلته m يتحرك بسرعة v كمية تحرك مقدارها $p = mv$. وكمية التحرك كمية متجهة في اتجاه السرعة نفسه، ويُقاس بوحدة $kg\ m\ s^{-1}$. وينتج التغيُّرفي كمية التحرك عن قوة محصلة تؤثرخلال فترة زمنية. ولقوة محصلة ثابتة، $J = F\Delta t$، $J = \Delta p$. لذا فإن قانون نيوتن الثاني بصيغة كمية التحرك هو $\frac{\Delta p}{\Delta t}$. لذا فإن زيادة زمن التأثيرلنفس التغيُّر في كمية التحرك، يؤدى إلى نقصان القوة المحصلة المتوسطة، بينما نقصان زمن التأثيريؤدى إلى زيادة القوة المحصلة المتوسطة.

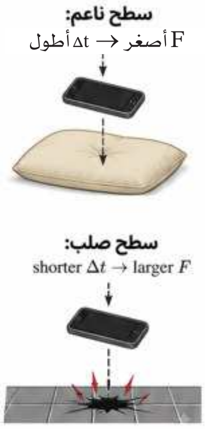


شكل (4.7.1)

⭐ تطبيق سريع:

حاصل ضرب قوة محصلة ثابتة في الفترة الزمنية التي تؤثرخلالها.

$J = f\Delta t$؛ وهو متجه في اتجاه القوة المحصلة، ويُقاس بوحدة N•s.



شكل (5.7.1)

نقطة

- ! يُطلق على حاصل ضرب كتلة الجسم m [كجم] وسرعته v [م/ث] اسم "كمية التحرك" (أو كمية الحركة)، وهويمثل مقدارالحركة. ووحدته هي كجم•م/ث، ويُعبَّرعنه بالصيغة: $p = mv$.
- ! أما حاصل الضرب $F\Delta t$ [نيوتن.ثانية] فيُطلق عليه اسم "الدفع"، وهو يمثل التغيرفي كمية التحرك. ووحدته هي نيوتن•ثانية. فإذا كان كمية التحرك قبل التغيرهو mv [كجم•م/ث] وكمية التحرك بعده هو mv'، فإن العلاقة تُكتب بالصيغة: $J = mv' - mv = F\Delta t$، وبذلك تكون صيغة قانون نيوتن الثاني بدلالة الزخم هي: $F = \Delta p$.
- ! يؤدي طول زمن التفاعل إلى تقليل متوسط القوة عند ثبات مقدارالتغيرفي كمية التحرك؛ حيث يُحسب متوسط القوة بقسمة الدفع على الزمن.

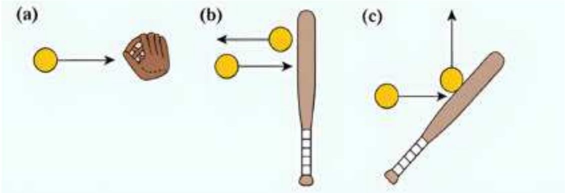
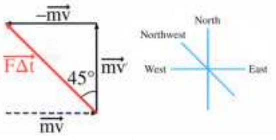
صندوق المعادلات:

كمية التحرك:	$P = mv$
الدفع:	$J = F\Delta t = \Delta p$
قانون نيوتن الثاني (بصيغة كمية التحرك):	$J = \frac{\Delta p}{\Delta t}$

مثال محلول:

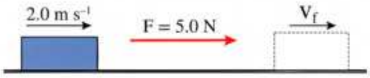
حقيقة أساسية:

إذا توقف جسم يتحرك بسرعة (v) عن الحركة، فإن مقدار التغيّر في كمية تحركه هو (mv). وإذا ارتد بالسرعة نفسها في الاتجاه المعاكس، فإن مقدار التغيّر في كمية تحركه هو (mv_2). فعكس اتجاه كمية التحرك، بدلاً من تقليله إلى الصفر، يؤدي إلى مضاعفة الدفع.

الموقف:	تتحرك كرة كتلتها 6.0×10^{-2} kg نحو الشرق بسرعة $20\ m\ s^{-1}$. لكل حالة من الحالات التالية، أوجد اتجاه ومقدار الدفع المؤثر على الكرة. (أ) عندما تُلتقَط الكرة. (ب) عندما تُضرَب لترتد غربًا بالسرعة نفسها. (جـ) عندما تُضرَب لترتد شمالًا بالسرعة نفسها. 
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** $v = 20\ m\ s^{-1}$ ، $m = 6.0\times10^{-2}$ kg (شرقًا). **المطلوب:** الدفع
التمثيل:	ارسم متجه كمية التحرك الابتدائية، $p_i = mv_i$، في اتجاه الحركة الابتدائية للكرة. ولكل حالة، حدد متجه كمية التحرك النهائية، $p_f = mv_f$. ويساوي الدفع التغيّر المتجه في كمية التحرك: $J = \Delta p = p_f - p_i = m(v_f - v_i)$
الاستراتيجية:	طبِّق نظرية الدفع وكمية التحرك: $F\Delta t = mv' - mv$ قيِّم كل حالة على حدة باستخدام السرعة النهائية.
الحل الموضح:	(أ) اعتبر الاتجاه الشرقي موجبًا. عندما تُلتقَط الكرة، تصبح سرعتها صفرًا. $F\Delta t = (6.0\times10^{-2})\times0-(6.0\times10^{-2})\times20$ $= -1.2$ N s غربًا (ب) $F\Delta t = (6.0\times10^{-2})\times(-20)-(6.0\times10^{-2})\times20$ $= -2.4$ N s غربًا (جـ) إذا اعتبرناها متجهًا، فستكون قيمة $F\Delta t$ كما هو موضح في الشكل الموجود على اليسار. **المقدار** $F\Delta t = 2\times6.0\times10^{-2}\times20$ $= 1.70 = 1.7$ N s $= -2.4$ N s اتجاه الشمال الغربى  $-\overrightarrow{mv}$ $\overrightarrow{F\Delta t}$ 45° $\overrightarrow{mv'}$ $\overrightarrow{mv}$ North Northwest West East شكل (6.7.1)
منطقية الحل:	يحدث أكبر دفع عندما ينعكس الاتجاه (الحالة b). ويُعطي التوقف دفعًا أصغر (الحالة a). ويُعطي تغيير اتجاه الحركة إلى الشمال دفعًا متوسطًا قطريًّا نحو الشمال الغربي (الحالة c).
فسِّرها بنفسك:	لماذا يكون الدفع في الحالة (ب) ضعف الدفع في الحالة (a)، رغم أن السرعة نفسها في كلتا الحالتين؟

جرِّب بنفسك: تؤثر قوة ثابتة مقدارها 5.0 N على جسم لمدة 2.0 s في اتجاه حركته.
أوجد مقدار الدفع المؤثر على الجسم بوحدة N•s.

حاول:



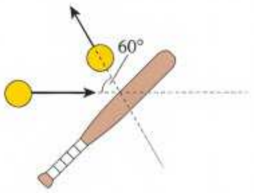
شكل (7.7.1)

(أ) تؤثر قوة مقدارها 5.0 N على جسم كتلته 4.0 kg يتحرك بسرعة $2.0\ m\ s^{-1}$ لمدة 2.0 s في اتجاه حركته.

(i) أوجد مقدار الدفع المؤثر على الجسم بوحدة N•s.

(ii) أوجد الزيادة في كمية تحرك الجسم بوحدة $kg\ m\ s^{-1}$.

(iii) أوجد سرعته النهائية بوحدة $m\ s^{-1}$.



شكل (8.7.1)

(ب) تتحرك كرة كتلتها 0.15 kg أفقيًّا بسرعة $30\ m\ s^{-1}$، وتُضرَب بمضرب لترتد بالسرعة نفسها بزاوية ارتفاع 60° عن الأفقي.

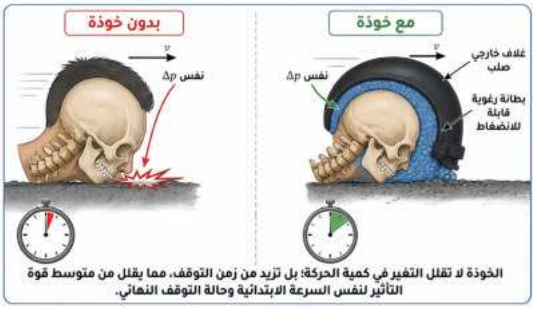
(i) أوجد مقدار الدفع المؤثر على الكرة.

(ii) إذا كان زمن التماس بين الكرة والمضرب $2.0 \times 10^{-2}\ s$، **فأوجد** مقدار متوسط القوة المؤثرة على الكرة بالنيوتن.

حقيقة أساسية:

في الجزء (ب)، تعكس الكرة اتجاهها، لذا ارسم متجهات كمية التحرك أولاً. والدفع هو التغيُّر المتجه في كمية التحرك، لا الفرق بين السرعتين.

في سياق جديد — كيف تقلل الخوذة قوة الارتطام



الخوذة لا تقلل التغير في كمية الحركة؛ بل تزيد من زمن التوقف، مما يقلل من متوسط قوة التأثير لنفس السرعة الابتدائية وحالة التوقف النهائي.

شكل (9.7.1)

عندما يسقط راكب دراجة نارية ويرتطم رأسه بالطريق، لا يمكن تجنب التغيّر في كمية التحرك لأن الرأس يجب أن يتباطأ حتى يتوقف. ومع ذلك، تزيد الخوذة الزمن الذي يستغرقه هذا التغيّر في كمية التحرك. تنضغط رغوة الخوذة الماصة للطاقة أثناء الارتطام، فتزيد زمن توقف الرأس ومسافة توقفه. وللتغيّر نفسه في كمية التحرك:

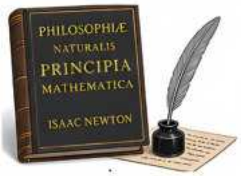
$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

وزيادة زمن التوقف تقلل متوسط قوة الارتطام، وبالتالي تقلل العجلة المتوسطة التي يتعرض لها الرأس.

لا تقلل الخوذة التغيُّر في كمية التحرك؛ بل تزيد زمن التوقف (زمن التأثير)، مما يقلل متوسط قوة الارتطام لنفس السرعة الابتدائية وحالة السكون النهائية.

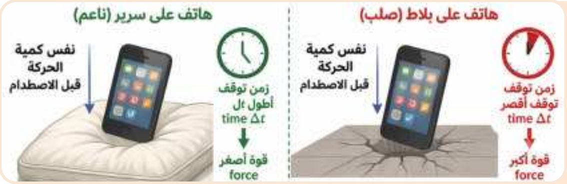
دورك الآن: فسِّر لماذا توفر بطانة خوذة أكثر سمكًا وليونة حماية أفضل للجمجمة، رغم أن مقدار التغيُّر في كمية تحرك الرأس يبقى دون تغيير.

طبيعة العلم: القوانين — قانون نيوتن الثاني [بصيغة كمية التحرك]



لم يصغ نيوتن (١٦٨٧) قانونه الثاني بصورة F = ma؛ بل نص على أن معدل تغيُّر كمية الحركة يتناسب مع القوة المؤثرة ويحدث في اتجاهها. وتقابل «كمية الحركة» كمية التحرك. وبالصيغة الحديثة: $F_{\text{المحصلة}} = \frac{\Delta p}{\Delta t}$. وعلى فترة زمنية: $F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$. وللكتلة الثابتة: $F_{\text{المحصلة}} = ma$. ويصف القانون العلمي علاقة ثابتة تسمح بالتنبؤ بالحركة، دون تفسير الأصل الفيزيائي للقوى. ويربط قانون نيوتن الثاني القوة بمعدل تغيُّر كمية التحرك.

دورك الآن: اقترح سببًا لاعتبار صيغة كمية التحرك $F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$. الصيغة العامة.


هاتف على بلاط (صلب)
نفس كمية الحركة قبل الاصطدام
زمن توقف توقف أقصر time Δt
قوة أكبر force
هاتف على سرير (ناعم)
نفس كمية الحركة قبل الاصطدام
زمن توقف أطول لـ time Δt
قوة أصغر force

شكل (10.7.1)

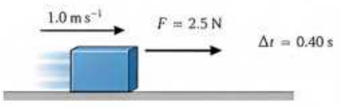
سؤال الدرس، وإجابته:

لماذا يقل احتمال تحطم هاتف عند سقوطه على سرير مقارنة بسقوطه على أرضية من البلاط، حتى لو سقط من الارتفاع نفسه؟

إذا ارتطم الهاتف بالسرير أو البلاط بالسرعة نفسها وتوقف دون ارتداد، يكون التغيّر في كمية التحرك نفسه في كلتا الحالتين. والفرق هو زمن التوقف. فالسرير يزيد زمن التوقف بتشوهه، مما يقلل متوسط القوة. أما أرضية البلاط فتوقف الهاتف في زمن أقصر بكثير، مما يُنتج متوسط قوة أكبر بكثير ويزيد احتمال حدوث ضرر.

تمرين:

أوجد ما يلي:


$1.0\ \text{m s}^{-1}$
$F = 2.5\ \text{N}$
$\Delta t = 0.40\ \text{s}$

شكل (11.7.1)

(أ) أثّرت قوة مقدارها 2.5 N على جسم كتلته 2.0 kg يتحرك بسرعة $1.0\ \text{m s}^{-1}$ لمدة 0.40 s في اتجاه حركته.

(i) أوجد مقدار الدفع المؤثر على الجسم بوحدة N•s.

(ii) أوجد الزيادة في كمية تحرك الجسم بوحدة kg m s^{-1}.

(iii) أوجد سرعته النهائية بوحدة m s^{-1}.

(ب) تُلتقَط كرة كتلتها 0.14 kg تتحرك بسرعة $40\ \text{m s}^{-1}$ بقفاز.

(i) أوجد مقدار الدفع الذي تتلقاه الكرة بوحدة N•s.

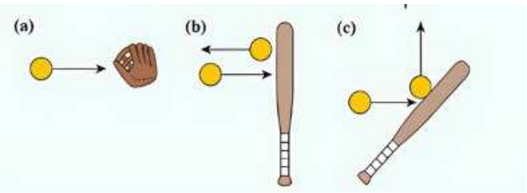
(ii) إذا كان زمن التماس بين الكرة والقفاز حتى تتوقف الكرة 2.0×10^{-2} s، **فأوجد** مقدار متوسط القوة التي تؤثر بها الكرة على القفاز بالنيوتن.

(جـ) تتحرك كرة كتلتها 3.0×10^{-2} kg نحو الشرق بسرعة $10\ \text{m s}^{-1}$. لكل حالة من الحالات التالية، أوجد مقدار واتجاه الدفع المؤثر على الكرة في الحالات الآتية.

(i) عندما تُلتقَط الكرة.

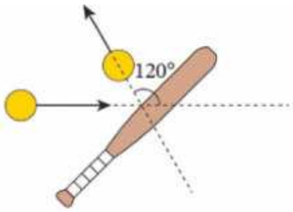
(ii) عندما تُضرَب لترتد غربًا بالسرعة نفسها.

(iii) عندما تُضرَب لترتد شمالًا بالسرعة نفسها.



شكل (12.7.1)

(د) تتحرك كرة كتلتها 0.40 kg أفقيًا بسرعة $10\ \text{m s}^{-1}$، وتُضرَب لترتد بالسرعة نفسها في اتجاه يصنع زاوية 120° مع اتجاهها الابتدائي. أوجد مقدار الدفع الذي تتلقاه الكرة، والزاوية بين اتجاه الدفع واتجاهها الابتدائي.

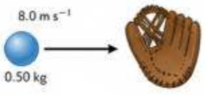


شكل (13.7.1)

سؤال بأسلوب الامتحان:

تتوقف كرة كتلتها 0.50 kg تتحرك بسرعة $8.0\ \text{m s}^{-1}$ عن الحركة بواسطة قفاز خلال 0.040 s.

أوجد الدفع المؤثر على الكرة.


$8.0\ \text{m s}^{-1}$
0.50 kg

شكل (14.7.1)

الدرس ١-٨ — حفظ كمية الحركة

؟ سؤال الدرس:
عندما تنزل من قارب صغير ساكن بجوار الرصيف، لماذا يتحرك القارب إلى الخلف؟ وما الذي يحدد سرعته؟

ستتعلم أن

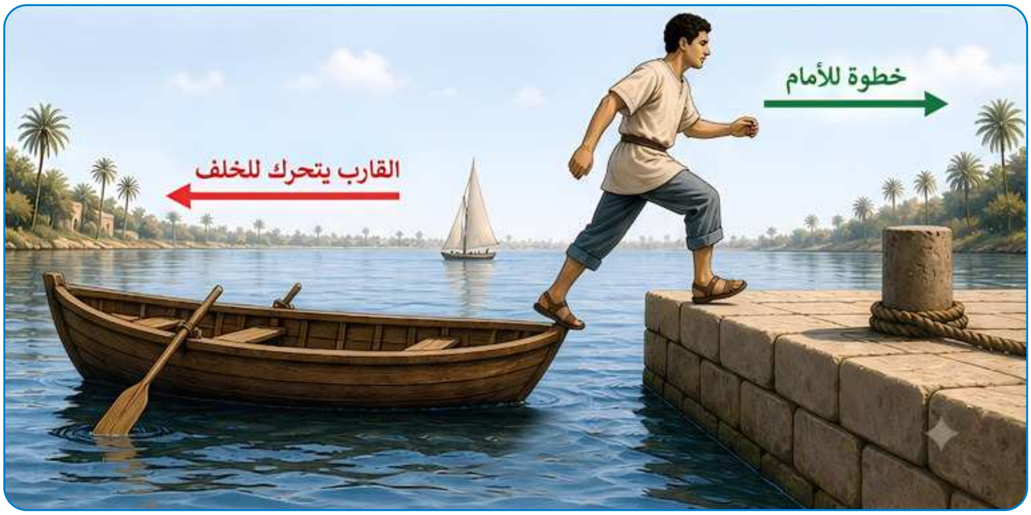
بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تشرح** لماذا تبقى كمية التحرك الكلية لنظام معزول ثابتةً.

٢. **تطبق** قانون حفظ كمية التحرك لحساب سرعات مجهولة قبل التصادم وبعده.

٣. **تحدد** النظام، وتختار محورًا، وتذكر الاتجاه الموجب عند تطبيق حفظ كمية التحرك.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر



شكل (1.8.1)

حقيقة أساسية:
كمية تحرك جسم هي $p = mv$. الدفع المؤثر بالقوة المحصلة خلال فترة زمنية. التغيُّر في كمية التحرك.

تنهي رحلة على قارب صغير وتخطو إلى الأمام نحو رصيف حجري. ومع تحرك قدمك إلى الأمام، ينزلق القارب إلى الخلف، فتزداد الفجوة بين القارب والرصيف. وإذا خطوت برفق، يبتعد ببطء، بينما تعطيه دفع أقوى سرعة خلفية أكبر. لا أحد آخر يدفع القارب – ومع ذلك يتحرك إلى الخلف. لاحظ القارب في المرة القادمة التي ينزل فيها أحدهم إلى اليابسة.

توقَّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) أثناء الدفع، هل تتغير قيمة كمية التحرك لديك ولدى القارب بشكل متساوٍ أم مختلف؟

(ب) يتلقى قارب فارغ وقارب محمَّل بصناديق نفس الدفع. أي القاربين يرتد بسرعة أكبر؟

استكشف — الارتداد عند تدافع طالبين

ما ستفعله: تقيس المسافة التي يتحركها طالبان على كرسيَّين بعجلات بعد أن يتدافعا، وتستقصي كيف تعتمد مسافة كل منهما على كتلته.

الزمن: 20 دقيقة.

ما تحتاجه:

- كرسيان معمليان بعجلات يتحركان بحرية.
- أرضية أفقية ملساء بشريط بداية محدَّد.
- طباشير أو شريط لاصق لتحديد موضع توقف كل كرسي.
- طالب أثقل وآخر أخف لمحاولة الكتلتين غير المتساويتين.

الخطوات:

١ يجلس طالبان متقابلان على الكرسيَّين، مع تلامس راحتَي أيديهما، وكلاهما ساكن على شريط البداية.

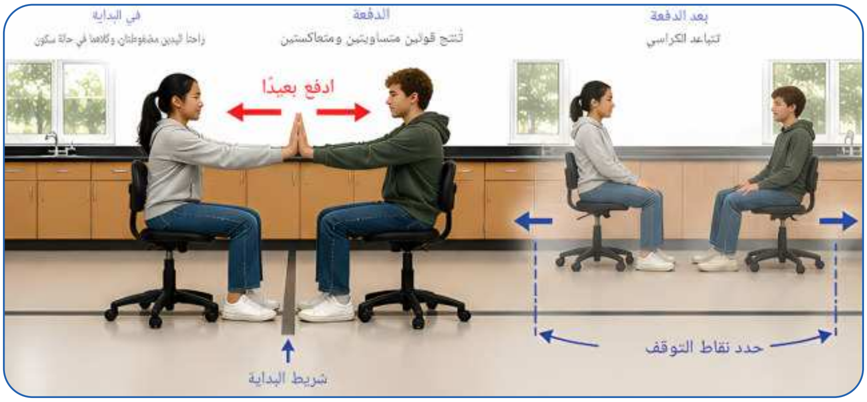
٢ عند العد، يدفع الطالبان بقوة مرة واحدة براحتَي أيديهما، ثم يُبقيان يديهما ثابتتين بينما يتدحرج الكرسيان بعيدًا عن بعضهما. حدِّد موضع توقف كل كرسي.

٣ كرر التجربة بطالب أثقل يقابل طالبًا أخف، من شريط البداية نفسه.

٤ قِس استطالة كل شريط مطاطي مرة أخرى.

٥ كرر مرة أخرى، لكن هذه المرة يدفع طالب واحد فقط بينما يُبقي الآخر ذراعيه صلبتين. حدِّد نقاط التوقف مرة أخرى.

ملاحظة القياس:
تختلف احتكاك الأرضية من موضع إلى آخر، لذا أبقِ كل محاولة على الشريط المحدَّد نفسه، وقارن مسافات التوقف ضمن الزوج نفسه فقط، لا بين أجزاء مختلفة من الغرفة.


في البداية
راحتا اليدين مضغوطتان وكلاهما في حالة سكون
الدفعة
تُنتج قوتين متساويتين ومتعاكستين
بعد الدفعة
تتباعد الكراسي
ادفع بعيدًا
حدد نقاط التوقف
شريط البداية

شكل (2.8.1)

الزوج	أي طالب تحرك مسافة أبعد؟
كتلتان متقاربتان	
أثقل مقابل أخف	
دفع من جانب واحد	

حلِّل ما جمعته:

(أ) عندما تختلف كتلتا الطالبين، أيهما يتحرك مسافة أبعد؟ كيف تعتمد المسافة التي يتحركها كل منهما على كتلته؟

(ب) عندما دفع طالب واحد فقط، هل تحرك ذلك الكرسي وحده، أم تحرك الكرسيان؟ ماذا يخبرك هذا عن القوى أثناء التفاعل؟

اكتب، في سطرين، لماذا يتحرك كلا الكرسيَّين حتى عندما يدفع طالب واحد فقط – قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، تحرك الكرسي الأخف دائمًا بعيدًا بسرعة أكبر، والملاحَظ أن الكرسيَّين تحركا بعيدًا عن بعضهما حتى عندما دفع طالب واحد فقط. وقد يتوقع المرء أن يتحرك الكرسي المدفوع وحده، أو أن يتحرك ذلك الكرسي مسافة أبعد مع دفعة أقوى؛ لكن الملاحظات تُظهر خلاف ذلك. لا يعمل الكرسيان بشكل مستقل؛ بل يتفاعلان كزوج. فكلما دفع أحد الكرسيين الآخر، يدفعه الآخر بقوة مساوية في المقدار ومعاكسة في الاتجاه، تؤثر للزمن نفسه تمامًا. لذا يتلقى كل كرسي دفعًا مساويًا في المقدار ومعاكسًا في الاتجاه، فيخضع كل منهما لتغيّر متساوٍ ومتعاكس في كمية التحرك؛ ولأن الكرسي الأخف كتلته أصغر، فإنه يتحرك بعيدًا بسرعة أكبر. ويفسر النموذج التالي هذه الملاحظات.

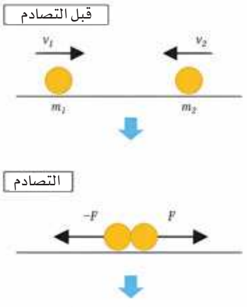
نظام معزول:

مجموعة من الأجسام تُعتبَر معًا نظامًا واحدًا. يكون النظام معزولًا خلال فترة زمنية إذا كان صافي الدفع الخارجي صفرًا. لذا تبقى كمية تحركه الكلية ثابتةً.

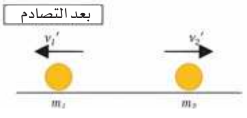
النموذج: حفظ كمية التحرك:

تُسمى مجموعة الأجسام قيد الدراسة نظامًا. وتُسمى القوى التي تؤثر بها الأجسام على بعضها داخل النظام قوى داخلية، وتُسمى القوى التي تؤثر بها عوامل خارج النظام قوى خارجية.

تظل كمية التحرك الكلية للنظام كما هو قبل التصادم وبعده. ويُسمى هذا المبدأ قانون حفظ كمية التحرك.



شكل (3.8.1)



شكل (4.8.1)

عندما يصطدم الجسم A بكتلة m^1 وسرعة v^1 بالجسم B بكتلة m^2 وسرعة v^2، وتصبح سرعتاهما v_1' و v_2' على التوالي:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$$

مجموع كمية التحرك قبل التصادم = مجموع كمية التحرك بعد التصادم

وينطبق قانون حفظ كمية التحرك عندما يكون الدفع المؤثر على النظام يساوي صفرًا، أي أن القوة الخارجية المحصلة عليه صفر.

تطبيق سريع:

يصطدم جسم كتلته 5 kg، ساكن ابتدائيًا، إلى جسمين: يتحرك جسم كتلته 3 kg شرقًا بسرعة $4\ m\ s^{-1}$، بينما يتحرك جسم كتلته 2 kg غربًا بسرعة $6\ m\ s^{-1}$. بيِّن أن كمية التحرك محفوظة.

نقطة

! تُسمى مجموعة الأجسام محل الدراسة "نظاماً". وتُعرف القوى التي تؤثر بها الأجسام على بعضها البعض داخل النظام بـ "القوى الداخلية"، بينما تُعرف القوى التي تؤثر بها أجسام من خارج النظام بـ "القوى الخارجية".
لا يتغير كمية التحرك الكلية للنظام المعزول أثناء التصادم.

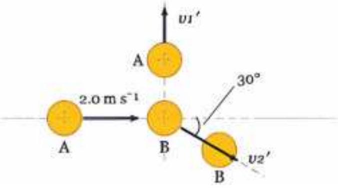
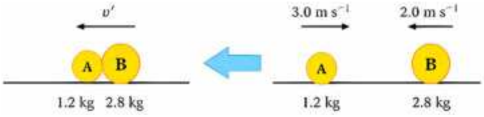
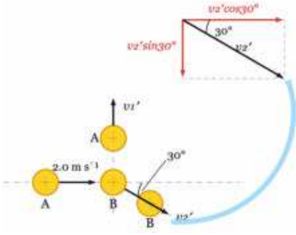
! فعندما يصطدم الجسم (A) -الذي كتلته m_1 وسرعته v_1- بالجسم (B) - الذي كتلته m_2 وسرعته v2- وتصبح سرعتُهما v_1' و v_2' على التوالي، فإن المعادلة تكون:
$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v_1' + m_2v_2'$.
وتتحقق هذه العلاقة في حال عدم وجود دفع ناتج عن قوى خارجية.

! كما تتحقق أيضاً إذا وُجدت قوى خارجية -مثل الجاذبية- ولكن يمكن إهمال تأثيرها. وفي حالة الحركة في مستوى، يتم تحليل المتجهات إلى مركبات في اتجاهي المحورين x و y.

صندوق المعادلات:

حفظ كمية التحرك على طول محور (جسمان):	$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$
كمية تحرك جسم:	$p = mv$

مثال محلول:

الموقف:	(أ) يتحرك الجسم A كتلته 1.2 kg في الاتجاه الموجب بسرعة $3.0\ m\ s^{-1}$، ويتحرك الجسم B كتلته 2.8 kg في الاتجاه السالب بسرعة $2.0\ m\ s^{-1}$ على خط مستقيم، فيتصادمان ويلتصقان معًا. أوجد السرعة بعد التصاقهما بـ $m\ s^{-1}$. (ب) على سطح أفقي أملس، يصطدم الجسم A كتلته 0.20 kg متحركًا بسرعة $2.0\ m\ s^{-1}$ بالجسم B كتلته 0.80 kg الساكن. أوجد السرعتين النهائيتين للجسمين A وB بعد التصادم. 
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات** (أ): $m_A = 1.2\ kg$, $v_A = +3.0\ m/s$, $m_B = 2.8\ kg$, $v_B = -2.0\ m/s$. **المطلوب:** السرعة النهائية v'. **المعطيات** (ب): $m_A = 0.20\ kg$, $v_A = 2.0\ m/s$, $m_B = 0.80\ kg$, $v_B = 0$. **المطلوب:** السرعتان النهائيتان لـ A و B.
التمثيل:	(أ) حركة في بعد واحد باتجاه موجب محدد. (ب) حركة في بعدين (تحلل إلى مركبتين متعامدتين) كمية التحرك تظل ثابتة بشكل مستقل في الاتجاهين (محورى السينات والصادات)
الاستراتيجية:	طبِّق حفظ كمية التحرك في (أ)، يتحرك الجسمان معًا بعد التصادم. وفي (ب)، حلِّل الحركة واستخدم حفظ كمية التحرك في الاتجاهين المتعامدين.
الحل الموضح:	(a) $1.2 \times (3.0) + 2.8 \times (-2.0) = (1.2 + 2.8)v'$ $3.6 - 5.6 = 4.0v' \rightarrow v' = -0.50\ m/s$  v′ 3.0 m s⁻¹ 2.0 m s⁻¹ A B A B 1.2 kg 2.8 kg 1.2 kg 2.8 kg شكل (5.8.1) (b) (i) x: $0.20 \times 2.0 + 0.80 \times 0 = 0.20 \times 0 + 0.80 \times v'_2 \cos 30°$ (ii) y: $0.20 \times 0 + 0.80 \times 0 = 0.20 \times v'_1 - 0.80 \times v'_2 \sin 30°$ (iii) $v'_2 =: \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}}{3} = 00.577... \approx 0.58\ m/s$ $v'_1 = \frac{2.0}{\sqrt{3}} = \frac{2.0\sqrt{3}}{3} = 1.15... \approx 1.2\ m/s$ **A:** 1.2 m/s. **B:** 0.58 m/s  v2′cos30° 30° v2′ v2′sin30° v1′ A 2.0 m s⁻¹ 30° A B B v2′ شكل (6.8.1)

حقيقة أساسية:

اختر الاتجاه الموجب قبل تطبيق حفظ كمية التحرك.
وتشير السرعة السالبة إلى حركة معاكسة للاتجاه الموجب المختار.

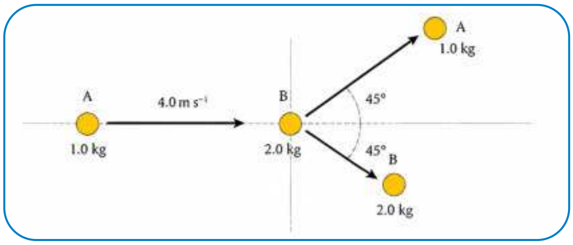
منطقية الحل:	(أ) السرعة النهائية سالبة، بما يتفق مع كمية التحرك الكلية الأكبر في الاتجاه السالب. (ب) كلتا السرعتين النهائيتين أقل من السرعة الابتدائية، بما يتفق مع تقاسم كمية التحرك بين الجسمين.
فسِّرها بنفسك:	في الجزء (a)، لماذا يمكنك جمع كميتي التحرك كعددين لهما إشارة على خط واحد بدلاً من تحليلهما إلى محورين؟

حاول:

(أ) يتحرك الجسم A كتلته 2.0 kg في الاتجاه الموجب بسرعة $4.0\ \text{m s}^{-1}$، ويتحرك الجسم B كتلته 3.0 kg في الاتجاه السالب بسرعة $4.0\ \text{m s}^{-1}$ على خط مستقيم، فيتصادمان. إذا كانت سرعة الجسم B بعد التصادم $2.0\ \text{m s}^{-1}$ في الاتجاه الموجب، **فأوجد** سرعة الجسم A بعد التصادم بـ m s^{-1}.

(ب) يصطدم جسم كتلته 8.0 kg، ساكن، إلى جسم A كتلته 3.0 kg وجسم B كتلته 5.0 kg. إذا تحرك الجسم A بعد التصادم يسارًا بسرعة $10\ \text{m s}^{-1}$، **فأوجد** سرعة الجسم B واتجاهه بعد التصادم.

(جـ) على سطح أفقي أملس، يصطدم الجسم A كتلته 1.0 kg متحركًا بسرعة $4.0\ \text{m s}^{-1}$ بالجسم B كتلته 2.0 kg الساكن. وبعد التصادم، ينحرف A بزاوية 45° فوق الأفقي وينحرف B بزاوية 45° أسفل الأفقي. أوجد السرعة النهائية للجسمين A وB بعد التصادم.

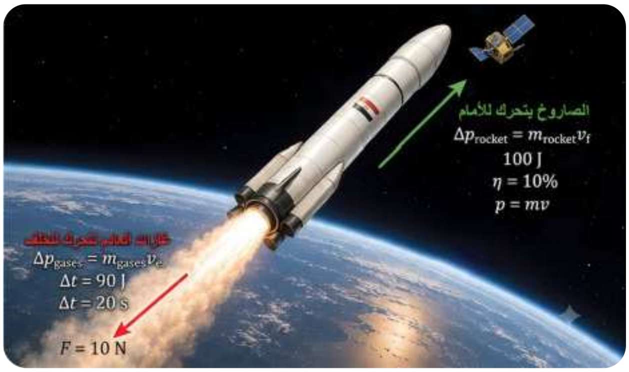

A
1.0 kg
4.0 m s⁻¹
B
2.0 kg
A
1.0 kg
45°
45°
B
2.0 kg

شكل (7.8.1)

في سياق جديد — دفع الصواريخ

يعمل الصاروخ بطرد غازات العادم إلى الخلف بسرعة عالية. وتكتسب الغازات كمية تحرك خلفية، بينما يكتسب الصاروخ كمية تحرك أمامية مساوية له. بالنسبة لنظام الصاروخ والعادم، إذا كان الدفع الخارجي مهملًا، تُحفَظ كمية التحرك الكلية: $\Delta p_{\text{الصاروخ}} = -\Delta p_{\text{العادم}}$.

أثناء الإطلاق، تؤثر الجاذبية إلى أسفل، لذا يتسارع الصاروخ إلى أعلى فقط عندما يكون دفعه أكبر من وزنه (بإهمال مقاومة الهواء).


الصاروخ يتحرك للأمام
$\Delta p_{\text{rocket}} = m_{\text{rocket}} v_{\text{f}}$
100 J
$\eta = 10\%$
$p = mv$
$\Delta p_{\text{gases}} = m_{\text{gases}} v_{\text{e}}$
$\Delta t = 90$ J
$\Delta t = 20$ s
$F = 10$ N

شكل (8.8.1)

فسِّر لماذا يمكن للصاروخ أن يتسارع في فراغ الفضاء رغم عدم وجود وسط خارجي يدفع ضده.

طبيعة العلم - الأدلة - اختبار الفرضية في ضوء قوانين الحفظ

في عام ١٩٣٠، بدت قياسات اضمحلال جسيمات بيتا (β) وكأنها تُظهر أن بعض الطاقة وكمية التحرك مفقودان من النواتج المرصودة. وبدلًا من التخلي فورًا عن قوانين الحفظ المُختبَرة جيدًا، اقترح فولفجانج باولي (Wolfgang Pauli) أن جسيمًا متعادلًا غير مُكتشَف يحمل الطاقة وكمية التحرك المفقودين.

وعُرف هذا الجسيم لاحقًا باسم النيوترينو (neutrino). وقدَّم اقتراح باولي تنبؤًا قابلًا للاختبار: فإذا كان الجسيم موجودًا، فقد تكتشف التجارب في النهاية دليلاً على تفاعلاته.

وفي عام ١٩٥٦، أعلن فريدريك راينز وكلايد كاوان (Frederick Reines – Clyde Cowan) عن الاكتشاف التجريبي للنيوترينو.

وتُظهر هذه الواقعة أن القوانين الراسخة لا تُقبَل دون تمحيص. فالعلماء يتمسكون بها ما دامت الأدلة تدعمها بقوة، لكنهم أيضًا يطورون ويختبرون تفسيرات بديلة عندما تبدو الملاحظات الجديدة غير متسقة مع تلك القوانين.

دورك الآن: لماذا كان اقتراح فرضية قابلة للاختبار عن جسيم أكثر فائدة علميًّا من مجرد إعلان فشل قوانين الحفظ؟

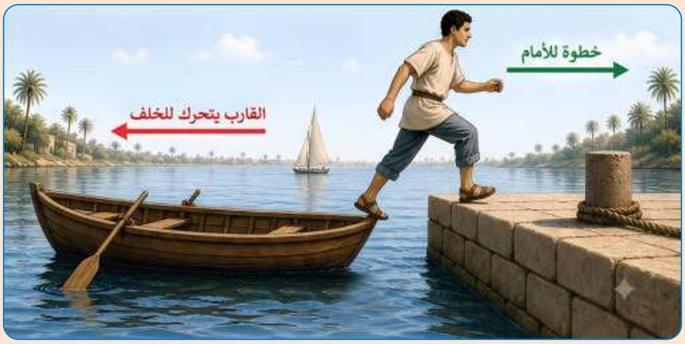
سؤال الدرس، وإجابته:

عندما تنزل من قارب صغير واقف على رصيف، لماذا يتحرك القارب إلى الخلف؟ وما الذي يحدد سرعته؟

اعتبر الشخص والقارب نظامًا واحدًا. كمية التحرك الكلية ابتدائيًا تساوي صفر. وأثناء الدفع القصير، يكون الدفع الخارجي الأفقي مهملًا، لذا تُحفَظ كمية التحرك:

$$p_{\text{الشخص}} + p_{\text{القارب}} = 0$$

يكتسب الشخص والقارب كميتين تحرك متساويتين ومتعاكستين. وبما أن $p = mv$، يتحرك القارب الأخف أسرع من القارب الأثقل لنفس كمية التحرك.



شكل (9.8.1)

تمرين:

(أ) يتحرك الجسم A كتلته 2.0 kg في الاتجاه الموجب بسرعة $3.0\ m\ s^{-1}$ على خط مستقيم، فيصطدم بالجسم B كتلته 1.0 kg الساكن، ويلتصقان معًا. **أوجد** السرعة بعد التصاقهما بـ $m\ s^{-1}$.

(ب) تصطدم العربة A كتلتها 2.0 kg متحركة بسرعة $4.5\ m\ s^{-1}$ على خط مستقيم بالعربة B كتلتها 5.0 kg المتحركة بسرعة $0.40\ m\ s^{-1}$ في نفس الاتجاه. إذا تحركت العربة B بعد التصادم بسرعة $2.6\ m\ s^{-1}$ في اتجاهها الأصلي، **فأوجد** سرعة العربة A واتجاهها بعد التصادم.

نصيحة امتحانية:

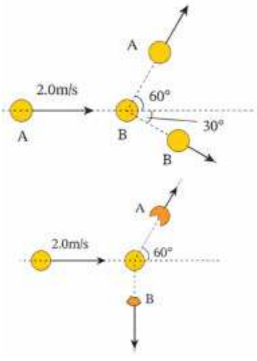
اذكر الاتجاه الموجب واكتب

$$\Sigma p_{\text{بعد}} = \Sigma p_{\text{قبل}}$$

للمحور قبل أي حساب.

سؤال بأسلوب الامتحان:

تصطدم عربة كتلتها 1.5 kg تتحرك بسرعة $2.0\ m\ s^{-1}$ اصطدامًا أماميًّا بعربة ساكنة كتلتها 0.50 kg على مسار أملس، وتتحرك العربتان معًا. أوجد السرعة النهائية للعربتين الملتصقتين بـ $m\ s^{-1}$.



شكل (10.8.1)

(جـ) يصطدم جسم كتلته 7.0 kg، ساكن، إلى جسم A كتلته 4.0 kg وجسم B كتلته 3.0 kg. إذا تحرك الجسم A بعد التصادم يسارًا بسرعة $9.0\ \text{m s}^{-1}$، فأوجد سرعة الجسم B واتجاهه بعد التصادم.

(د) يصطدم جسم كتلته m، ساكن، إلى جسم A وجسم B. إذا تحرك الجسم A الذي كتلته $\left(\frac{3}{2}\right)m$ في الاتجاه الموجب بسرعة v، **فأوجد** سرعة الجسم B واتجاهه بعد التصادم.

(هـ) على سطح أفقي أملس، يصطدم الجسم A كتلته 0.20 kg متحركًا بسرعة $2.0\ \text{m s}^{-1}$ بالجسم B كتلته 0.60 kg الساكن. وبعد التصادم، ينحرف A بزاوية 60° فوق الأفقي وينحرف B بزاوية 30° أسفله، **أوجد** السرعة النهائية للجسمين A وB بعد التصادم.

(و) على سطح أفقي أملس، يصطدم جسم كتلته 5.0 kg يتحرك بسرعة $2.0\ \text{m s}^{-1}$ إلى جسم A كتلته 4.0 kg وجسم B كتلته 1.0 kg. وبعد التصادم، ينحرف A بزاوية 60° فوق الأفقي ويتحرك B مباشرة إلى أسفل، **أوجد** سرعة الجسمين A وB بعد الانقسام.

الدرس ١-٩ — كمية التحرك والطاقة الميكانيكية

؟ سؤال الدرس:

تتصادم عربتان وتلتصقان معًا وتتحركان بسرعة أبطأ. إذا كانت كمية تحركهما الكلية محفوظة، فلماذا تنخفض طاقتهما الحركية الكلية، وإلى أي صور من الطاقة تنتقل؟

ستتعلم أن

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تذكر** متى يتم حفظ كمية التحرك الكلية، وتميز بين التصادمات المرنة وغير المرنة.

٢. **تحسب** النقصان في طاقة الحركة الكلية أثناء تصادم غير مرن.

٣. **تفسر** كيف تنتقل طاقة الحركة إلى صور أخرى أثناء تصادم غير مرن.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر

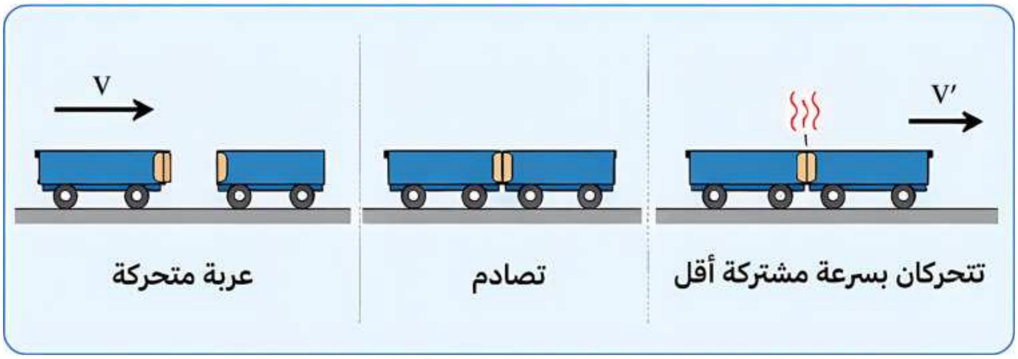
حقيقة أساسية:

لنظام معزول:

$$\Sigma \vec{p}_{\text{قبل}} = \Sigma \vec{p}_{\text{بعد}}$$

ولكل جسم:

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$



شكل (1.9.1)

تصطدم عربة معملية متحركة بعربة ثانية ساكنة ابتدائيًا. وتتسبب وسادات لاصقة عند طرفيهما في التصاق العربتين وتحركهما بسرعة مشتركة بعد التصادم. وتكون سرعتهما المشتركة أقل من السرعة الابتدائية للعربة المتحركة. وقد يُسمع صوت قصير أثناء التصادم، وقد تتعرض العربتان والوسادتان لتشوه طفيف. وتشير هذه الملاحظات إلى أن بعض طاقة الحركة تنتقل إلى صور أخرى من الطاقة. قارن الحركة قبل التصادم وبعده.

توقَّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) بعد التصاق العربتين، هل يكون كمية التحرك الكلية أقل أم تظل كما هي أم أكبر مما كانت عليه من قبل؟

(ب) ماذا يحدث للطاقة الحركية الكلية — هل تصبح أقل، أم تبقى كما هي، أم تصبح أكبر؟

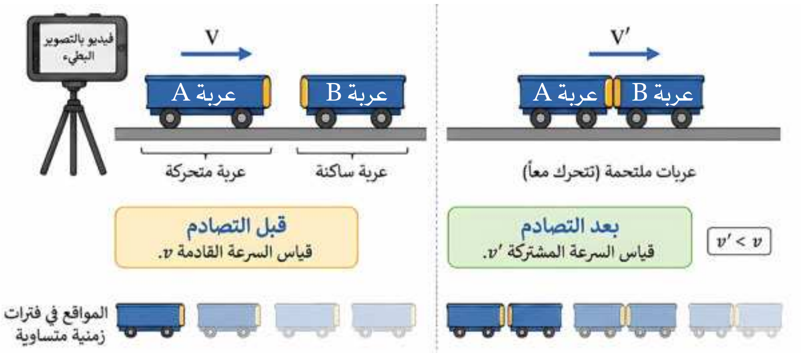
استكشف — كمية التحرك والطاقة الحركة في تصادم غير مرن

ما ستفعله: تسجل فيديو بالحركة البطيئة لعربتين تتصادمان، ثم تقارن حركتهما قبل التصادم وبعده.

الزمن: 12 دقيقة.

ما تحتاجه:

- هاتف بخاصية تصوير الحركة البطيئة.
- عربتان معمليتان بوسادة لاصقة (خطاف وحلقة).
- شريط قياس يوضع بجانب المسار للمقياس.


فيديو بالتصوير البطيء
v
عربة A
عربة B
عربة متحركة
عربة ساكنة
قبل التصادم
قياس السرعة القادمة v.
v′
عربة A
عربة B
عربات ملتحمة (تتحرك معاً)
بعد التصادم
قياس السرعة المشتركة v′.
v′ < v
المواقع في فترات زمنية متساوية

شكل (2.9.1)

⭐ ملاحظة القياس:

بمعدل إطارات ثابت، تمثّل الأعداد المتساوية من فترات الإطارات فترات زمنية متساوية. قِس كلتا السرعتين عبر العدد نفسه من فترات الإطارات، قُبيل التصادم وبعده مباشرة.

الخطوات:

١ قِس وسجّل كتلة كل عربة. ضع العربة B ساكنة على مسار أفقي قليل الاحتكاك.

٢ أطلق العربة A بحيث تصطدم بالعربة B. ويجب أن تتسبب الوسادات اللاصقة عند الطرفين المتقابلين في التصاق العربتين. سجّل التصادم كاملًا بالحركة البطيئة.

٣ ضع شريط قياس موازيًا للمسار وقريبًا من مسار العربتين. استخدم معدل إطارات الفيديو والمسافة المقطوعة عبر عدة إطارات لتحديد: سرعة العربة A قُبيل التصادم مباشرة؛ والسرعة المشتركة للعربتين الملتصقتين بعد التصادم مباشرة.

٤ لاحظ ما إذا كان صوت أو اهتزاز أو تشوه مرئي يحدث أثناء التصادم.

٥ أضف كتلة بإحكام إلى العربة B وكرر الإجراء. حافظ على السرعة الابتدائية للعربة A متقاربة قدر الإمكان.

المحاولة	كتلة العربة A (kg)	كتلة العربة B (kg)	السرعة قبل التصادم v(m/s)	السرعة المشتركة بعد التصادم v′(m/s)	هل لوحظ صوت أو تشوه؟
عربة هدف أخف					
عربة هدف أثقل					

حلّل ما جمعته:

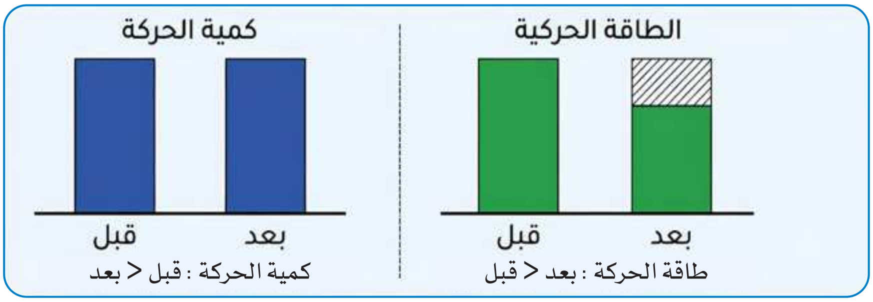
(أ) لكل محاولة، احسب كمية التحرك الكلية والطاقة الحركة الكلية قبل التصادم وبعده. هل القيم متساوية تقريبًا؟

(ب) فسِّر كيف تمدنا ملاحظات الصوت أو الاهتزاز أو التشوه دليلًا على أن بعض الطاقة الحركة انتقلت إلى صور أخرى من الطاقة.

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، تحركت العربتان معًا بسرعة مشتركة أقل من السرعة الابتدائية للعربة المتحركة. كما سُمع صوت قصير عند التصاق العربتين. ويُظهر استخدام الكتل والسرعات المقاسة نتيجة أدق: كانت كمية التحرك الكلية قبل التصادم وبعده متساوية تقريبًا، بينما كانت طاقة الحركة الكلية بعد التصادم أصغر. لم تُفقَد الطاقة الحركة. بل انتقل بعضها إلى صور أخرى من الطاقة، منها الطاقة الداخلية المرتبطة بالتشوه والاهتزاز، والصوت. ويفسر النموذج التالي كيف يمكن أن تُحفَظ كمية التحرك حتى عندما تنخفض طاقة الحركة.



شكل (3.9.1)

حقيقة أساسية:

في التصادم غير المرن، لا تُحفَظ طاقة الحركة. أما في التصادم المرن، فتُحفَظ الطاقة الحركة (على النقيض)

نقطة

! يُطلق على مجموع الطاقة الحركية وطاقة الوضع للنظام اسم "الطاقة الميكانيكية". عندما يتحرك جسم كتلته m [كجم] بسرعة v [م/ث]، فإن طاقته الحركية Ek [جول] تُحسب بالعلاقة: $Ek = \frac{1}{2}mv^2$.

! عند تصادم الأجسام، تكون سرعتها النسبية بعد التصادم أقل من أو مساوية لسرعتها النسبية قبله؛ لذا، ففي حالات التصادم العادية (غير الانفجارية)، يحقق "معامل الارتداد" e — وهو النسبة بين السرعة النسبية بعد التصادم والسرعة النسبية قبله — الشرط: $0 \le e \le 1$. عندما تكون e = 1، يُسمى التصادم "تصادماً مرناً تماماً"؛ وعندما تكون $0 \le e < 1$، يُسمى "تصادماً غير مرن"؛ أما التصادم غير المرن الذي تكون فيه e = 0 فيُسمى "تصادماً غير مرن تماماً"، حيث تلتحم الأجسام لتصبح جسماً واحداً بعد التصادم.

! في التصادم المرن (e=1)، تُحفظ الطاقة الميكانيكية. أما في التصادم غير المرن ($0 \le e < 1$)، فتنقص الطاقة الميكانيكية؛ إذ يتحول جزء منها إلى طاقة داخلية مرتبطة بالتشوه والاهتزاز، وإلى طاقة صوتية.

صندوق المعادلات:

طاقة الحركة لجسم:	$E_k = \frac{1}{2}mv^2$
بقاء كمية التحرك (نظام معزول):	$m_A v_A + m_B v_B = m_A v'_A + m_B v'_B$
طاقة الحركة المفقودة:	$\Sigma E_{k,\text{قبل}} - \Sigma E_{k,\text{بعد}}$

تطبيق سريع:

تتحرك عربة واحدة كتلتها 2.0 kg بسرعة 4.0 m/s. احسب طاقتها الحركية بالجول.

الحالة غير المرنة تمامًا:

في التصادم، نقصت طاقة الحركة الكلية للعربتين. وتُعرَّف الطاقة الميكانيكية لنظام بأنها مجموع طاقتي الحركة و الوضع للنظام، وبما أن العربتين تحركتا على مسار أفقي، بقيت طاقة وضعهما الجاذبية ثابتة. لذا يقابل النقص في طاقة الحركة الكلية نقصًا في الطاقة الميكانيكية للنظام. ولا تُحفَظ الطاقة الميكانيكية في هذا التصادم غير المرن. إذ ينتقل بعض الطاقة الميكانيكية إلى طاقة داخلية، وتشوه، واهتزاز، وصوت. وعندما تتصادم الأجسام، تكون سرعتها النسبية بعد التصادم أقل من أو تساوي سرعتها النسبية قبل التصادم، لذا يحقق معامل الارتداد e، بالنسبة للتصادمات العادية (غير المرنة)، الشرط $0 \le e \le 1$.

عندما $e = 1$، يُسمى التصادم **تصادمًا مرنًا تمامًا**.

وعندما $0 \le e < 1$، يُسمى **تصادمًا غير مرن**.

ومن بين التصادمات غير المرنة، يُسمى التصادم الذي فيه $e = 0$ تحديدًا تصادمًا غير مرن تمامًا (إذ يصبحان جسمًا واحدًا بعد التصادم).

- في التصادم المرن ($e = 1$)، تُحفَظ الطاقة الميكانيكية.
- في التصادم غير المرن ($0 \le e < 1$)، تنخفض الطاقة الميكانيكية.

عند تصادم جسمين، تُعرف النسبة بين مقدار السرعة النسبية بعد التصادم ومقدارها قبل التصادم باسم "معامل الارتداد". ويعتمد معامل الارتداد هذا على مواد الجسمين المتصادمين.

فإذا كانت سرعتا الجسمين قبل التصادم هما v_1 وv_2، وسرعتاهما بعد التصادم هما v_1' وv_2'، وكان معامل الارتداد هو e، فإن العلاقة تكون: $v_1' - v_2' = -e(v_1 - v_2)$.

مثال محلول:

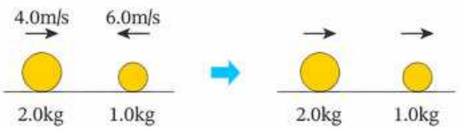
الموقف:	تتحرك كرة صغيرة A كتلتها 1.0 kg يمينًا بسرعة 4.0 m/s وتصطدم أماميًا بكرة صغيرة ساكنة B كتلتها 1.5 kg. ومعامل الارتداد 0.25. أوجد ما يلي: (أ) السرعتين النهائيتين للكرتين بعد التصادم بـ m/s. (ب) الطاقة الميكانيكية المفقودة في التصادم بالجول. (بافتراض أن اتجاه اليمين موجب)
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** $m_A = 1.0\,kg, v_A = +4.0\,m/s, m_B = 1.5\,kg, v_B = 0\,m/s, e = 0.25.$ **المطلوب:** (أ) السرعتان النهائيتان v'_A وv'_B (ب) الطاقة الميكانيكية المفقودة أثناء التصادم.
التمثيل:	لتكن سرعتا الكرتين الصغيرتين A وB بعد التصادم v'_A وv'_B.
الاستراتيجية:	استخدم حفظ كمية التحرك مع معادلة معامل الارتداد لتحديد السرعتين النهائيتين. ثم احسب طاقة الحركة الكلية قبل التصادم وبعده وأوجد الفرق.
الحل الموضح:	**(أ) من قانون حفظ كمية التحرك:** $1.0 \times 4.0 + 1.5 \times 0 = 1.0 \times v'_A + 1.5 \times v'_B$ $v'_A + 1.5\,v'_B = 4.0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$ ومن معادلة معامل الارتداد: $v'_A - v'_B = -0.25\,(4.0 - 0)$ $v'_B - v'_A = 1.0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$ وبحل (1) و(2): $v'_A = 1.0\,m/s, v'_B = 2.0\,m/s$ (ب) مجموع طاقة الحركة قبل التصادم $= \frac{1}{2} \times 1.0 \times 4.0^2 + \frac{1}{2} \times 1.5 \times 0^2 = 8.0\,J$ ومجموع طاقة الحركة بعد التصادم $= \frac{1}{2} \times 1.0 \times 1.0^2 + \frac{1}{2} \times 1.5 \times 2.0^2 = 3.5\,J$ الفرق: $\Delta E_K = EK_{\text{قبل}} - EK_{\text{بعد}} = 8.0\,J - 3.5\,J = 4.5\,J$

منطقة الحل:	بما أن ($e = 0.25 < 1$)، فإن التصادم غير مرن، لذا لا تُحفَظ الطاقة الميكانيكية. وتنخفض طاقة الحركة الكلية بمقدار $4.5\ J$.
فسِّرها بنفسك:	فسِّر لماذا تُحفَظ كمية التحرك أثناء التصادم رغم أن الطاقة الميكانيكية لا تُحفَظ.

جرِّب بنفسك: تتحرك كرة صغيرة A كتلتها $2.0\ kg$ يمينًا بسرعة $4.0\ m\ s^{-1}$ وتصطدم اصطدامًا أماميًا بكرة صغيرة ساكنة B كتلتها $3.0\ kg$. وبعد التصادم، تلتصق الكرتان وتتحركان كجسم واحد. أوجد السرعة النهائية، ثم احسب الطاقة الحركة المفقودة بالجول.

حاول:

(أ) تتحرك كرة صغيرة A كتلتها $2.0\ kg$ يمينًا بسرعة $4.0\ m\ s^{-1}$ وتصطدم أماميًا على خط مستقيم بكرة صغيرة B كتلتها $1.0\ kg$ تتحرك يسارًا بسرعة $6.0\ m\ s^{-1}$. وبعد التصادم، تتحرك A بسرعة $1.0\ m\ s^{-1}$ يمينًا وتتحرك B بسرعة $4.0\ m\ s^{-1}$ يمينًا. اعتبر اتجاه اليمين موجبًا. (علما بأن معامل الارتداد بين الكرتين 0.5)

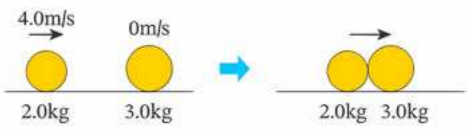


شكل (4.9.1)

(i) استنتج أن كمية التحرك محفوظة في التصادم.

(ii) أوجد الطاقة الحركة المفقودة بعد التصادم بالجول.

(ب) تتحرك كرة صغيرة A كتلتها $2.0\ kg$ يمينًا بسرعة $4.0\ m\ s^{-1}$ وتصطدم أماميًا على خط مستقيم بكرة صغيرة ساكنة B كتلتها $3.0\ kg$، وتلتصقان معًا. اعتبر اتجاه اليمين موجبًا.



شكل (5.9.1)

(i) أوجد السرعة النهائية للكرتين بـ $m\ s^{-1}$.

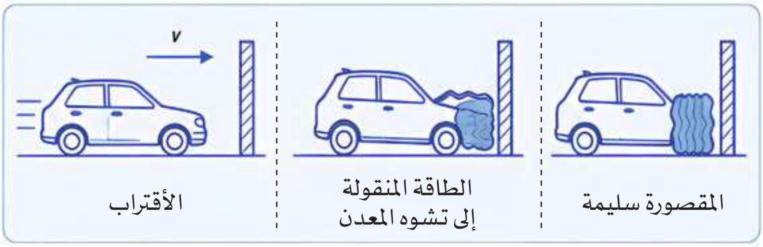
(ii) أوجد الطاقة الحركة المفقودة بعد التصادم بالجول.

حقيقة أساسية:

في الجزء (a)، تُعطى السرعتان بعد التصادم، لذا يمكن استخدام حفظ كمية التحرك للتحقق. وفي الجزء (ب)، يتحرك الجسمان معًا وتكون سرعتهما المشتركة مجهولة. استخدم حفظ كمية التحرك لحساب هذه السرعة أولًا.

في سياق جديد — منطقة التشوة

يكون تصادم المركبات غير مرن إلى حد كبير. فأثناء الارتطام، تتشوه منطقة التصادم (أي أن حدث تغير فيزيائي في الهيكل المعدني للسيارة نتيجة التصادم)، فترتد المركبة أقل وتنخفض طاقتها الحركية. ويتحول الانخفاض في الطاقة الحركة بصورة رئيسية إلى طاقة داخلية عبر التشوه الدائم والاهتزازات الداخلية والتسخين، بينما ينتقل جزء أصغر إلى المحيط كصوت. كما يزيد التشوه الزمن الذي تتغيّر خلاله كمية تحرك المركبة، مما يقلل متوسط القوة المؤثرة على السائق والركاب.



شكل (6.9.1)

دورك الآن: فسِّر لماذا توفر السيارة المصممة بحيث عند وقوع حادث حماية أفضل لركابها مقارنة بالسيارة المصممة لتبقى صلبة؟.

طبيعة العلم: الأدلة — إلى أين تذهب الطاقة الحركة "المفقودة"

في عام ١٨٥٠، نشر جيمس جول تجربته بالعجلة المجدافية في مجلة «فيلوسوفيكال ترانزاكشنز». فقد أدارت أثقال ساقطة مجدافًا يحرّك ماء، وأنتج الشغل الميكانيكي ارتفاعًا قابلًا للقياس في درجة حرارة الماء. وكان هذا دليلًا على أن الشغل لم يُفقَد بل تحول إلى طاقة داخلية (حرارية). وتتغيّر الطاقة الحركة «المفقودة» في تصادم غير مرن بالطريقة نفسها، فتصبح طاقة داخلية، يمكن قياسها كارتفاع في درجة الحرارة. وباختصار، يجب أن يُدعَم أي ادعاء علمي بدليل قابل للقياس.

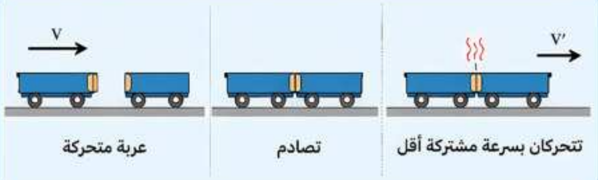
دورك الآن: اقترح لماذا يُعَدّ ارتفاع درجة الحرارة المقاس دليلًا أقوى من مجرد القول بأن الطاقة قد فُقدت.

سؤال الدرس، وإجابته:

تصطدم عربتان وتلتصقان معًا وتتحركان بسرعة أبطأ.

إذا كانت كمية تحركهما الكلية محفوظة، فلماذا تقل طاقة حركتهما الحركية الكلية، وإلى أي صور من الطاقة تنتقل؟

تُحفَظ كمية التحرك الكلية أثناء التصادم. لكن النقصان في الطاقة الحركة الكلية للجسمين المتصادمين يتحول بصورة رئيسية إلى طاقة داخلية عبر التشوه والاهتزازات الداخلية والتسخين، بينما تحمل موجات الصوت جزءًا أصغر منه.



تمرين:

(أ) تتحرك كرة صغيرة A كتلتها 2.0 kg يمينًا بسرعة 8.0 m s^{-1} وتصطدم على خط مستقيم بكرة صغيرة B كتلتها 1.0 kg تتحرك أمامها بسرعة 2.0 m s^{-1}. وبعد التصادم، تتحرك A بسرعة 5.0 m s^{-1} وتتحرك B بسرعة 8.0 m s^{-1}، كلتاهما يمينًا. اعتبر اتجاه اليمين موجبًا.

(i) استنتج أن كمية التحرك محفوظة في التصادم.

(ii) أوجد طاقة الحركة المفقودة بعد التصادم بالجول.

(ب) تتحرك كرة صغيرة A كتلتها 0.10 kg يمينًا بسرعة 3.0 m s^{-1} وتصطدم أماميًا على خط مستقيم بكرة صغيرة B كتلتها 0.20 kg تتحرك يسارًا بسرعة 2.0 m s^{-1}. وبعد التصادم، تتحرك A بسرعة 1.0 m s^{-1} يسارًا وتكون B ساكنة. اعتبر اتجاه اليمين موجبًا.

(i) استنتج أن كمية التحرك محفوظة في التصادم.

(ii) أوجد طاقة الحركة المفقودة بعد التصادم بالجول.

(جـ) تتحرك كرة صغيرة A كتلتها 1.0 kg يمينًا بسرعة 4.0 m s^{-1} وتصطدم اصطدامًا أماميًا على خط مستقيم بكرة صغيرة ساكنة B كتلتها 1.5 kg، وتلتصقان معًا. اعتبر اتجاه اليمين موجبًا.

(i) أوجد سرعة الكرتين الملتصقتين بـ m s^{-1}.

(ii) أوجد الطاقة الحركة المفقودة بعد التصادم بالجول.

(د) تتحرك كرة صغيرة A كتلتها 0.20 kg يمينًا بسرعة 10 m s^{-1} وتصطدم أماميًا على خط مستقيم بكرة صغيرة B كتلتها 0.30 kg تتحرك يسارًا بسرعة 5.0 m s^{-1}، وتلتصقان معًا. اعتبر اتجاه اليمين موجبًا.

(i) أوجد سرعة الكرتين الملتصقتين بـ m s^{-1}.

(ii) أوجد طاقة الحركة المفقودة بعد التصادم بالجول.

سؤال بأسلوب الامتحان:

تصطدم عربة A كتلتها 1.0 kg تتحرك بسرعة 4.0 m s^{-1} بعربة ساكنة B كتلتها 1.5 kg، وتلتصق العربتان معًا.

(أ) أوجد السرعة النهائية للعربتين الملتصقتين.

(ب) احسب الطاقة الحركة المفقودة بعد التصادم.

الدرس ١-١٠ — الحركة الدائرية المنتظمة والقوة المركزية

؟ سؤال الدرس:

تدور كرة في دائرة المعلقة بنهاية خيط. إذا قُطِع الخيط، في أي اتجاه ستتحرك الكرة؟

ستتعلم أن

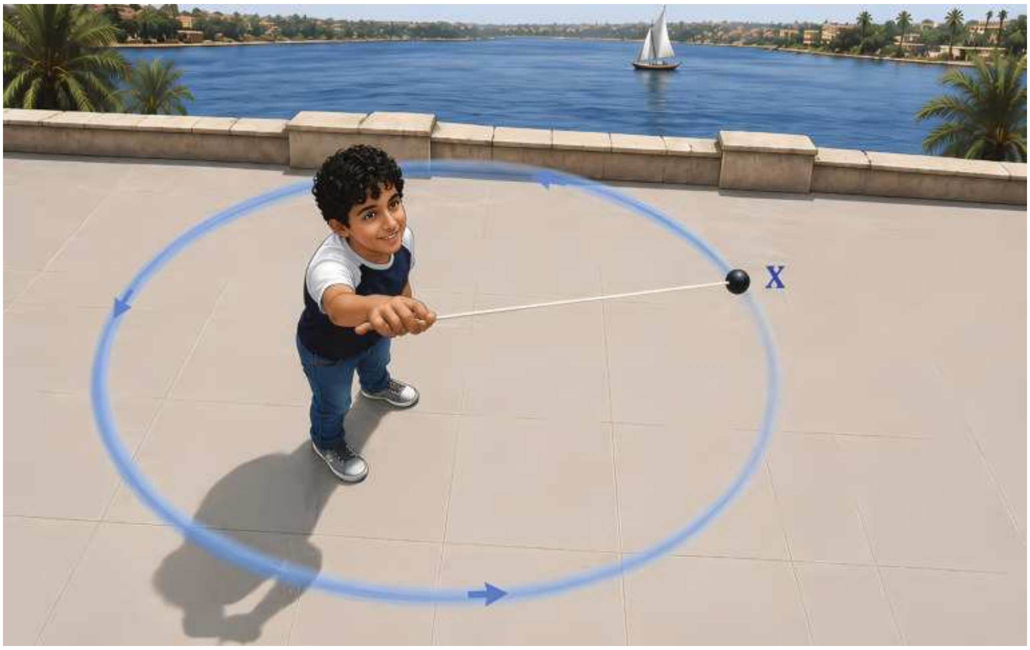
بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تحسب** الزمن الدوري (T)، والتردد (f)، والسرعة الزاوية (ω)، والسرعة الخطية (v) لجسم في حركة دائرية منتظمة.

٢. **تحدد** العجلة المركزية (a_c) للجسم وتحدد القوة التي توفرها.

٣. **تفسر** لماذا لا تؤثر قوة تعمل في إتجاه الخارج (طاردة مركزية) على جسم يتحرك في دائرة.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر



أدر كرة بواسطة خيط في دائرة أفقية فوق رأسك. يبقى الخيط مشدودًا، وتشعر يدك بجذب إلى الداخل ثابت طالما بقيت الكرة تتحرك في الدائرة. والآن افترض أن الخيط قُطع في اللحظة التي تكون فيها الكرة عند النقطة X. فمع انعدام أي قوة من الخيط، تصبح الكرة حرة. توقَّع المسار الذي تتبعه الكرة بعد النقطة X.

توقَّع قبل أن تستمر :

(أ) عندما يُقطع الخيط عند النقطة X، هل تتحرك الكرة:

(i) في خط مستقيم إلى الخارج على طول خط الخيط، **(ii)** على طول المماس للدائرة، أم **(iii)** تتبع مسارًا منحنيًا تدريجيًا؟

(ب) بينما تتحرك الكرة حول الدائرة بسرعة ثابتة، هل تؤثر عليها أي قوة تعمل الى الخارج؟ فسِّر إجابتك.

حقيقة أساسية:

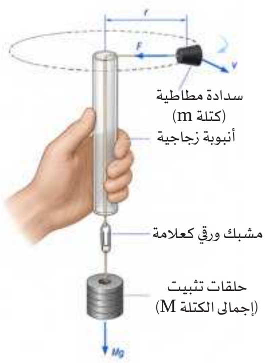
تتغيّر السرعة المتجهة عند تغيّر اتجاهها، لا عند تغيّر مقدارها فقط. لذا فإن جسمًا يتحرك في دائرة بسرعة ثابتة لا يزال يتسارع.

المعادلات:

$v = 2\pi r / T = \omega r$

$a_c = v^2 / r = \omega^2 r$

استكشف — اختبار معادلة القوة المركزية



ما ستفعله: تقيس سرعة جسم يتحرك في دائرة تحت تأثير قوة جاذبة مركزية معلومة، ثم تختبر المعادلة $F = mv^2/r$.

الزمن: 15 دقيقة.

ما تحتاجه:

- سدادة مطاطية مربوطة بإحكام بخيط قوي طوله نحو 0.5 m
- نظارات واقية، يرتديها كل من في المكان • مساحة واسعة وخالية
- طباشير أو شريط أرضي لرسم شبكة: دائرة، ومركزها، ونقاط الساعة 12 و3 و6 و9

ملاحظة سلامة:

أدر برفق في مساحة خالية، بعيدًا عن الآخرين والنوافذ والمصابيح. استخدم سدادة مطاطية — ولا تستخدم أبدًا جسمًا صلبًا. ارتدِ نظارات واقية.

الخطوات:

١ ارتدِ النظارات الواقية وتحقق من أن المساحة حولك خالية تمامًا. إذا لم تكن شبكة الأرضية مرسومة بالفعل، ارسم بالطباشير دائرة مع مركزها ونقاط الساعة 12 و3 و6 و9.

٢ لُفَّ الطرف الحر من الخيط حول إصبع واحد ثم قم بتدوير السدادة برفق في حركة دائرية أفقية فوق الشبكة. اشعر كيف يشد الخيط إصبعك، ولاحظ اتجاه الشد.

٣ مع إبقاء الدائرة ثابتة وبطيئة، اختر نقطة إطلاق على الشبكة. في اللحظة التي تمر فيها السدادة بتلك النقطة، افتح إصبعك لتحرير الخيط.

٤ راقب الاتجاه الذي تتحرك فيه السدادة أولًا: مباشرة إلى الخارج على طول الخط من المركز، أم على طول المماس. سجّل نقطة الإطلاق واتجاه الطيران.

٥ أوقف السدادة، ثم كرر التجربة لخمس نقاط إطلاق مختلفة حول الدائرة، مع إبقاء السرعة متقاربة في كل مرة.

٦ قارن محاولاتك الخمس وقرر ما إذا كان اتجاه الطيران يتبع نمطًا ثابتًا.

نقطة الإطلاق على الشبكة	اتجاه الطيران (إلى الخارج من المركز / على طول المماس)

سجل أيضًا: أثناء دوران السدادة، في أي اتجاه يشد الخيط إصبعك؟

حلّل ما جمعته:

(أ) عبر إطلاقاتك الخمس، ما النمط — هل تتحرك السدادة إلى الخارج من المركز، أم على طول المماس؟

(ب) بينما كانت تدور، بماذا شعر إصبعك — دفعًا إلى الخارج أم جذبًا إلى الداخل — وأي جسم جذب الآخر؟

اكتب، في سطرين، لماذا يجب أن تتحرك السدادة أسرع عند إضافة حلقات معدنية أكثر عند نصف القطر نفسه — قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، يسحب (يشد) الخيط السدادة بثبات إلى الداخل، نحو مركز الدائرة – ولم يسحبها أبدًا إلى الخارج – وعندما تم تحرير السدادة، تلاشى الشد، وتحركت السدادة في خط مستقيم مماس للدائرة عند نقطة التحرير. ربما كنت تتوقع أن تتحرك السدادة إلى الخارج على طول نصف القطر؛ لكن ملاحظاتك تُظهر عكس ذلك. وإليك النموذج الذي تدعمه أدلتك.

الحركة الدائرية

عندما يتحرك جسم في دائرة بسرعة ثابتة، تُسمى الحركة بالحركة الدائرية المنتظمة.

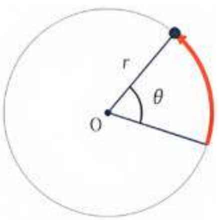
السرعة الزاوية ω هي الإزاحة الزاوية لكل وحدة زمن، بوحدة راديان في الثانية (rad s^{-1}). فإذا دار الجسم بزاوية θ (بالراديان) خلال زمن t (بالثانية): $\omega = \frac{\theta}{t}$.

والزمن الدوري T هو لعمل اللازم لزمن دورة واحدة، والتردد f هو عدد الدورات في الثانية (بوحدة Hz)

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \text{ ، } f = \frac{1}{T}$$

وبالنسبة لدائرة نصف قطرها r، يكون طول القوس المقطوع عندما يدور الجسم بزاوية θ هو $l = r\theta$ ، لذا تكون السرعة الخطية:

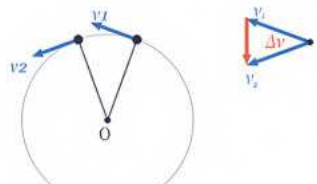
$$v = \frac{l}{t} = \frac{r\theta}{t} = r\omega$$



ورغم أن السرعة ثابتة، فإن السرعة المتجهة تتغيّر باستمرار في اتجاهها، لذا فإن الجسم يكتسب عجلة مركزية. وفي فترة قصيرة Δt، يحافظ متجه السرعة على مقداره v لكنه يدور بالزاوية الصغيرة نفسها $\Delta\theta = \omega\Delta t$.

ويكون التغيّر الناتج في السرعة المتجهة مقداره $\Delta v = v\Delta\theta$ ، ويتجه نحو مركز الدائرة. وبالقسمة على t، نحصل على Δ العجلة المتجهة نحو المركز – أي العجلة المركزية:

$$a_c = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v\Delta\theta}{\Delta t} = v\omega = r\omega^2 = \frac{v^2}{r}$$



وتبعًا لقانون نيوتن الثاني، تتطلب هذه العجلة قوة محصلة في الاتجاه نفسه – أي القوة المركزية:

حقيقة أساسية:

القوة المركزية هي القوة المحصلة المؤثرة على الجسم، وتتجه دائمًا نحو مركز الدائرة. وهي ليست قوة خارجية إضافية — فلا توجد «قوة طاردة مركزية» على الجسم نفسه.

أزِل القوة المتجهة نحو الداخل، سيستمر الجسم في التحرك في خط مستقيم في اتجاه المماس.

نقطة

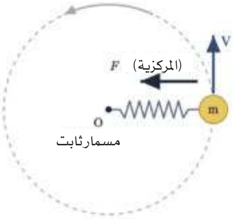
- عندما يتحرك جسم في مسار دائري بسرعة ثابتة، تُسمى هذه الحركة "حركة دائرية منتظمة". وتُعرف الزاوية التي يقطعها الجسم أثناء الدوران في وحدة الزمن بـ "السرعة الزاوية": فإذا دار الجسم بزاوية θ (بالراديان) خلال زمن t (بالثانية)، فإن $\omega = \frac{\theta}{t}$، وتُقاس بوحدة الراديان لكل ثانية (rad/s).
- الزمن الدوري والتردد: يُسمى الزمن T (بالثانية) اللازم لإتمام دورة واحدة بـ "الزمن الدوري": $T = 2\pi/\omega$. أما عدد الدورات في وحدة الزمن فيُعرف بـ "التردد" f (بالهرتز): $f = 1/T$. وفي مسار دائري نصف قطره r (بالمتر)، تكون المسافة المقطوعة $l = r\theta$، وبالتالي تكون السرعة $v = r\omega$.
- يتغير اتجاه الحركة حتى وإن ظل مقدار السرعة ثابتًا، مما يعني أن الجسم يكتسب تسارعًا $a = r\omega^2 = v^2/r$، ويكون هذا التسارع موجهاً دائماً نحو مركز الدائرة. وتُسمى القوة المحصلة المسببة لهذا التسارع بـ "القوة الجاذبة المركزية"، وتُكتب معادلة الحركة باتجاه المركز على الصورة: $F = mv^2/r$.

  وهذه المعادلة هي في الواقع صيغة للمعادلة $F = ma$ ولكنها مطبقة في اتجاه المركز.

صندوق المعادلات:

السرعة الزاوية ω :	$\omega = \frac{v}{t}$
العجلة المركزية:	$a_c = r\omega^2 = \frac{v^2}{r}$
القوة المركزية:	$F_c = m\,r\omega^2 = \frac{m\,v^2}{r}$

مثال محلول:

الموقف:	تُربَط كرة كتلتها 0.50 kg بنابض (زنبرك) وتتحرك حركة دائرية منتظمة على سطح أفقي أملس. ويكون النابض مشدودًا عن طوله الطبيعي، وتوفر قوته المرنة القوة المركزية اللازمة للحركة الدائرية.
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** $k = 20\ N\ m^{-1}$ ، $L = 0.25\ m$ ، $L_0 = 0.15\ m$ ، $m = 0.50\ kg$. **المطلوب:** (أ) قوة المرونة (ب) السرعة (جـ) العجلة المركزية.
التمثيل:	أظهر القوى المؤثرة على الكرة، ثم أوجد القوة الناتجة الموجهة نحو المركز — وهذه القوة الناتجة هي القوة الجاذبة المركزية. 
الاستراتيجية:	١. أوجد مقدار قوة المرونة من $F = kx$. حيث x هو معامل الاستطالة ٢. استخدم $F = \frac{mv^2}{r}$ لإيجاد v. ٣. استخدم $a_c = \frac{v^2}{r}$ لإيجاد العجلة المركزية a_c.
الحل الموضح:	(أ) $x = L - L_0 = 0.25 - 0.15 = 0.10\ m$ $F = kx = 20 \times 0.10 = 2.0\ N$ $F = 2.0\ N$ (ب) $\frac{mv^2}{r} = F \Rightarrow \frac{0.50\ v^2}{0.25} = 2.0$ $v^2 = 1.0 \Rightarrow v = 1.0\ m\ s^{-1}$ $v = 1.0\ m\ s^{-1}$ (جـ) $a_c = \frac{v^2}{r} = \frac{1.0}{0.25} = 4.0\ m\ s^{-2}$ $a_c = 4.0\ m\ s^{-2}$
منطقة الحل:	الاستطالة 0.10 m، لذا $F = kx = 2.0\ N$ — قوة صغيرة، بما يتفق مع ثابت النابض المنخفض. وتقابل $v = 1.0\ m\ s^{-2}$ دورًا $T = 2\pi r/v \approx 1.6\ s$، وهو معقول لهذا نصف القطر.
فسِّرها بنفسك:	لماذا تكون القوة المرنة التي يؤثر بها النابض القوة الوحيدة التي تسهم في القوة المحصلة نحو المركز في هذا الموقف؟

حقيقة أساسية:

تتحرك كرة حركة دائرية أفقية نصف قطرها 0.20m بزمن دورى مقداره 0.50 s. احسب سرعتها الخطية.

جرِّب بنفسك: يخضع جسم لحركة دائرية منتظمة، يُتم فيها 20 زمنًا دوريًّا خلال 5.0 s على محيط دائرة نصف قطرها 0.20 m.

أوجد ما يلي:

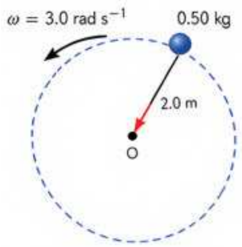
(أ) الزمن الدوري (ب) التردد الدوراني (جـ) السرعة الزاوية (د) السرعة الخطية.

حاول:

(أ) يخضع جسم لحركة دائرية منتظمة، يُتم فيها 10 دورات خلال 2.0 s على دائرة نصف قطرها 0.40 m. أوجد الزمن الدوري بالثانية.

(ب) بالنسبة للحركة نفسها، أوجد سرعتها الزاوية بوحدة $rad\ s^{-1}$ وسرعتها الخطية بوحدة $m\ s^{-1}$.

(جـ) تخضع كرة صغيرة كتلتها 0.50 kg مربوطة بخيط طوله 2.0 m لحركة دائرية منتظمة على سطح أفقي أملس بسرعة زاوية $3.0\ rad\ s^{-1}$. أوجد عجلتها المركزية.



(د) تُربَط كرة صغيرة كتلتها $8.0 \times 10^{-2}\ kg$ بأحد طرفَي نابض طوله الابتدائي 0.13 m وثابتة $60\ N\ m^{-1}$، وتُجعَل تخضع لحركة دائرية منتظمة على سطح أفقي أملس حول الطرف الآخر للنابض، مما يؤدي إلى طول نابض 0.15 m. أوجد ما يلي لأقرب رقمين معنويين:

(i) أوجد مقدار القوة المرنة (قوة الاستعادة) للنابض بالنيوتن.

(ii) أوجد سرعة الكرة الصغيرة بـ $m\ s^{-1}$.

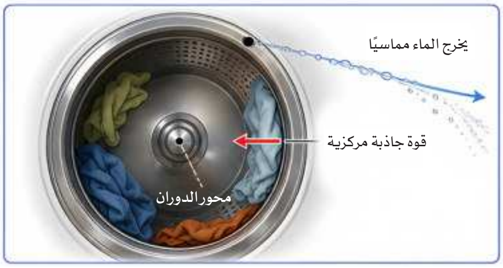
(iii) أوجد السرعة الزاوية للكرة الصغيرة بـ $rad\ s^{-1}$.

سؤال للربط:

لماذا لا تبذل القوة المحصلة نحو الداخل أي شغل على جسم يتحرك بسرعة ثابتة في دائرة؟

في سياق جديد — دورة لعصر الغسالة

أثناء دورة العصر، تتحرك الملابس المبللة مع الأسطوانة الدوارة في مسار دائري. وتوفر قوة رد الفعل العمودي التي يؤثر بها العمودية السطح الداخلي للأسطوانة معظم القوة الناتجة المتجهة إلى الداخل اللازمة لهذه الحركة. عند فتحة في الأسطوانة، لا يوجد جدار صلب لممارسة قوة التلامس الداخلية المطلوبة على الماء. ولذلك يستمر الماء في حركته بسرعته المماسية اللحظية. ونظرًا لأن الأسطوانة تنحرف عن هذا المسار المستقيم، يمر الماء عبر الفتحة ويتم تجميعه في الحوض الخارجي. ويخرج الماء من الأسطوانة لأنه لم يعد مقيدًا باتباع مساره الدائري



دورك الآن: لماذا يمر الماء عبر الثقوب في الأسطوانة الدوّارة بينما تبقى الملابس مضغوطة على الجدار الداخلي؟

طبيعة العلم: النظريات — علاقة قبل إطار أشمل

في عام ١٦٥٩، اشتق كريستيان هويغنس علاقة للحركة الدائرية المنتظمة. وبالتدوين الحديث، تكافئ نتيجته في المقدار $F_c = mv^2/r$. وقد توصّل هويغنس إلى هذه العلاقة هندسيًّا، قبل أن توفر قوانين نيوتن إطارًا أشمل يربط القوة المحصلة بالعجلة. وأظهرت نظرية نيوتن للجاذبية

الكونية لاحقًا أن الجاذبية توفر القوة الداخلية التي تُبقي الكواكب في مداراتها. ويوضح هذا كيف يمكن إرساء علاقة رياضية مفيدة قبل أن تصبح جزءًا من إطار نظري أشمل.

دورك الآن: اذكر كمية واحدة يمكن لعلاقة هويغنس حسابها، وسؤالًا واحدًا لا يمكنها الإجابة عنه.

سؤال الدرس، وإجابته:

تدور كرة في دائرة بواسطة خيط. إذا قُطع الخيط، في أي اتجاه تتحرك الكرة؟

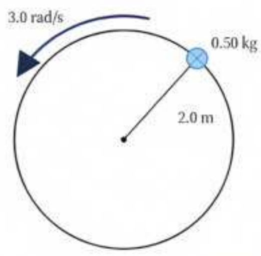
تتحرك على طول المماس للدائرة عند نقطة التحرير - أي الاتجاه الذي كانت تتحرك فيه بالفعل - لا إلى الخارج بعيدًا عن المركز.

فبينما كانت تتحرك في الدائرة، أبقاها الجذب إلى الداخل لشد الخيط، أي القوة المركزية، على مسارها الدائري. ولا توجد قوة إلى الخارج (طاردة مركزية)، فالجذب إلى الخارج الذي تشعر به في يدك هو جذب الخيط ليدك. وعندما يُقطع الخيط، تختفي هذه القوة المتجهة الى الداخل، فلا تعود توجد قوة تُغيّر اتجاهها، وتستمر في خط مستقيم على طول المماس.

حقيقة أساسية:

قبل حل مسألة حركة دائرية، حدِّد أولًا القوة المؤثرة نحو مركز الدائرة.

تمرين:

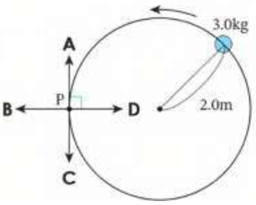


(أ) رُبطت كرة صغيرة كتلتها 0.50 kg بأحد طرفَي خيط طوله 2.0 m، وجُعلت تخضع لحركة دائرية منتظمة على سطح أفقي أملس حول الطرف الآخر للخيط، وأصبحت سرعتها الزاوية $3.0\ \text{rad s}^{-1}$.

(i) أوجد سرعة الكرة الصغيرة بـ m s^{-1}.

(ii) أوجد عجلة الكرة الصغيرة بـ m s^{-2}.

(iii) أوجد مقدار القوة اللازمة لاستمرار الحركة الدائرية بالنيوتن.



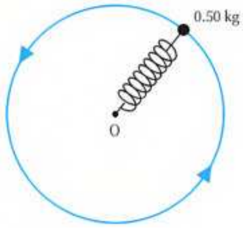
(ب) كما في الشكل على اليسار، يتحرك جسم كتلته 3.0 kg في دائرة نصف قطرها 2.0 m بسرعة ثابتة، ليصنع دورة كاملة واحدًا خلال 4.0 s. افترض أن $\pi = 3.14$.

(i) أوجد السرعة الزاوية للجسم في الحركة الدائرية بـ rad s^{-1}.

(ii) أوجد سرعة الجسم في الحركة الدائرية بـ m s^{-1}.

(iii) أوجد مقدار العجلة بـ m s^{-2}. وأيضًا، عند النقطة P في الشكل، أي اتجاه من A إلى D هو اتجاه العجلة؟ أجب برمز.

(iv) أوجد مقدار القوة المركزية اللازمة لهذه الحركة الدائرية بالنيوتن.



(جـ) تُربَط كرة صغيرة كتلتها 0.50 kg بأحد طرفَي نابض طوله الأصلي (الطبيعي) 0.10 m وثابته $30\ \text{N m}^{-1}$، وتُجعَل تخضع لحركة دائرية منتظمة على سطح أفقي أملس حول الطرف الآخر للنابض. إذا كانت السرعة الزاوية الناتجة $6.0\ \text{rad s}^{-1}$، أوجد استطالة النابض بالمتر.

الدرس ١-١١ — الحركة الدائرية: الأفقية والرأسية

؟ سؤال الدرس:

لماذا يمكن أن يبقى الماء داخل دلو عند أعلى نقطة في دائرة رأسية؟

ستتعلم أن

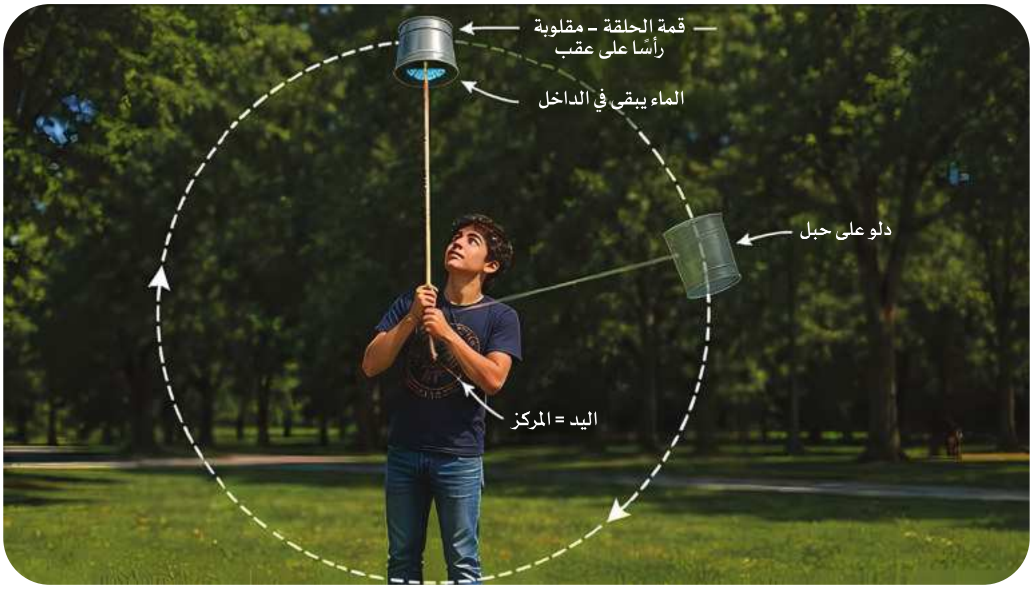
بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تحدد** القوى في الحركة الدائرية الأفقية والرأسية.

٢. **تحلل** الحركة الدائرية الأفقية والرأسية.

٣. **تحدد** قوة الشد وأقل سرعة لازمة في الحركة الدائرية الرأسية.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر



اربط دلوًا صغيرًا يحتوي على ماء بحبل وحرّكه بسرعة في دائرة رأسية فوق رأسك. عند أعلى نقطة في الدائرة، يكون الدلو مقلوبًا، ومع ذلك يبقى الماء داخله ولا ينسكب. والآن قلِّل سرعة الدلو تدريجيًّا. عند سرعة معيّنة، يبدأ الماء بالانسكاب بالقرب من أعلى نقطة في المسار الدائرى. قبل أن تكمل القراءة، تخيَّل الدلو عند أعلى نقطة في حركته وحدد ما الذي يُبقي الماء داخله.

توقَّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) عند أعلى نقطة، ما الذي يُبقي الماء داخل الدلو: قوة الشد في الحبل، أم دفع الدلو، أم الجاذبية، أم لا شيء على الإطلاق؟

(ب) هل توجد أقل قيمة للسرعة عند أعلى نقطة يتسرب الماء دونها؟ وإذا كان الأمر كذلك، ما الذي يحدد أقل قيمة للسرعة؟

استكشف — تحريك دلو ماء في دائرة رأسية

ما ستفعله: ستتعرف على السرعة اللازمة لتحريك دلو من الماء في دائرة رأسية للحفاظ على الماء بداخله، والمكان الذي يخرج منه الماء من الدلو لأول مرة عندما تكون السرعة بطيئة للغاية.

الزمن: 30 دقيقة.

ما تحتاجه:

- دلو صغير بمقبض، أو كوب بلاستيكي مربوط بإحكام بخيط قوي.
- ماء بكمية كافية لملء جزء من الدلو.
- هاتف أو كاميرا بخاصية الحركة البطيئة.
- مساحة خارجية واسعة وخالية.

ملاحظة سلامة:

نفِّذ النشاط في مساحة خارجية واسعة وخالية، بعيدًا عن الآخرين والنوافذ. استخدم كمية صغيرة فقط من الماء، وتحقق من إحكام المقبض أو الخيط قبل كل محاولة.

الخطوات:

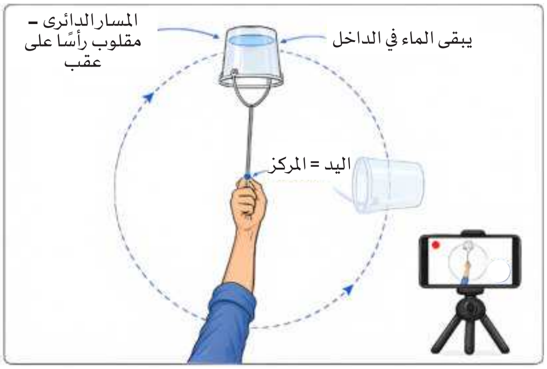
١ املأ جزءًا من الدلو بالماء. أمسك المقبض وحرِّك الدلو في دائرة رأسية بسرعة ثابتة بجانبك، بسرعة كافية لبقاء الماء طوال الدورة الكاملة.

٢ اطلب من زميل تصوير الحركة الدائرية بالحركة البطيئة، مع ظهور الدورة كاملة.

٣ قلِّل السرعة تدريجيًّا، في كل زمن دوري، حتى يبدأ الماء في الانسكاب الدلو أولًا.

٤ من مقطع الحركة البطيئة، حدِّد أين على الدائرة ينسكب الماء أولًا — عند الأسفل، أم عند الجانب، أم بالقرب من الأعلى؟

٥ قارن سرعة الدلو عند الأعلى عندما يبدأ الماء بالانسكاب بسرعته هناك في المحاولة الأسرع التي تُبقي الماء بالداخل.


المسار الدائرى – مقلوب رأسًا على عقب
يبقى الماء في الداخل
اليد = المركز

سرعة المحاولة	هل انسكب الماء؟ (نعم/ لا)	أين ينسكب الماء من الدلو أولًا؟
سريعة		
متوسطة		
بطيئة		

حلِّل ما جمعته:

(أ) عند الانسكاب الأول، في أي مكان على الدائرة يبدأ الماء في الخروج من الدلو — في القاع، أم على الجانب، أم بالقرب من القمة؟

(ب) اشرح لماذا يجب تحريك الدلو بسرعة كافية حتى يظل الماء محجوزا في الجزء العلوي. ما الذي يوفر القوة التي تحافظ على حركة الماء في دائرة في ذلك الموضع، وماذا يحدث عندما تكون سرعة الدوران بطيئة جدًّا؟

اكتب، في سطرين، ما الذي يجب أن يكون صحيحًا بشأن السرعة عند الأعلى ليبقى الماء بالداخل — قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

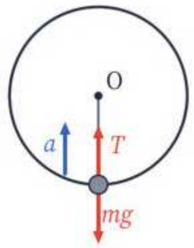
من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، بقي الماء داخل الدلو طوال حركته في دائرة رأسية عندما كانت سرعة الدلو عالية بما يكفي. ومع تقليل السرعة تدريجيًا، بدأ الماء بالانسكاب الدلو أولًا بالقرب من أعلى نقطة في المسار الدائري. وقد يبدو للوهلة الأولى أن قوة صاعدة لازمة لإبقاء الماء في الدلو عند الأعلى. لكن فيديو الحركة البطيئة يُظهر خلاف ذلك، فالقوة المحصلة المطلوبة تتجه نحو مركز المسار الدائري، وهو عند الأعلى إلى أسفل رأسيًا. وتؤيد أدلة التجربة نموذج الحركة الدائرية الرأسية، الذي تتغيّر فيه السرعة حول الدائرة.

نصيحة امتحانية:
تأكد من فهمك للأشكال التوضيحية والطريقة المستخدمة لحساب الشد في الخيط عندما يتحرك جسم في دائرة رأسية.

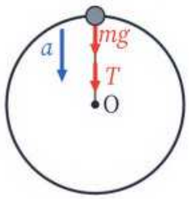
الحركة الدائرية الرأسية:

اعتبر جسمًا كتلته m، مربوطًا بخيط طوله r، يتحرك في حركة دائرية رأسية. تتغيّر سرعته الآن حول الدائرة – تكون أكبر ما يمكن عند قاع المسار، وأقل ما يمكن عند الأعلى. ويُظهر الشكل الجسم في ثلاثة مواضع وكيفية إيجاد الشد عند كل منها، حيث v هي سرعته عند ذلك الموضع. ويكون الشد أقل ما يمكن عند الأعلى وأكبر ما يمكن عند الأسفل.



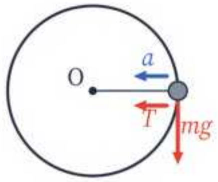
$$T - mg = \frac{mv^2}{r}$$

$$\therefore\ T = \frac{mv^2}{r} + mg$$



$$T + mg = \frac{mv^2}{r}$$

$$\therefore\ T = \frac{mv^2}{r} - mg$$



$$T = \frac{mv^2}{r}$$

أقل قيمة للسرعة عند القمة:

في الجزء العلوي من الدائرة، يعمل كل من قوة الشد (T) والوزن (mg) في اتجاه المركز، لذا:

$$\frac{mv^2}{r} = T + mg$$

الخيط يقوم بالسحب (الشد) فقط، لذا لا يمكن أن تكون قوة الشدّ سالبة؛ وعند حالة الاتزان (الحالة الحرجة) يصبح الشدّ صفرًا تمامًا. $T = 0$

$$\frac{mv^2}{r} = mg$$

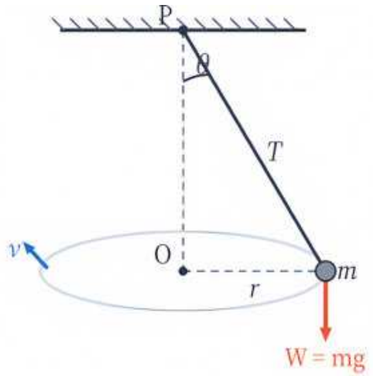
وتتعين أقل سرعة من العلاقة:

$$v_{min} = \sqrt{gr}$$

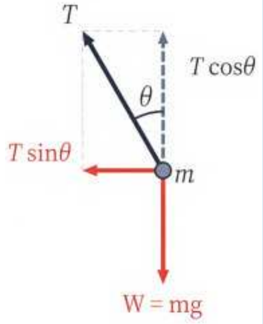
هذه هي أقل قيمة للسرعة اللازمة لكي يحافظ الجسم على حركته الدائرية دون أن يرتخي الخيط عند أعلى نقطة في الدائرة.

البندول المخروطي:

اعتبر جسمًا كتلته m مربوطًا بخيط PQ طوله l. وتكون l مثبّتة عند دعامة، ويتحرك الجسم في دائرة أفقية نصف قطرها r. وعندما يتحرك الجسم بسرعة ثابتة، يصنع الخيط زاوية ثابتة θ مع الرأسي.



يوضح الشكل القوى المؤثرة على الجسم: وزنه W = mg وقوة الشد T، التي تُحلَّل إلى مركبة أفقية T sin θ ومركبة رأسية T cos θ. وبما أن الجسم يتحرك في مسار دائري، فلا بد أن تؤثر عليه قوة جاذبة مركزية باتجاه مركز الدائرة O. وتنشأ القوة بواسطة المركبة الأفقية لقوة الشد، T sin θ. باستخدام المعادلة $F = ma_c$



$$(1) \quad T \sin\theta = \frac{mv^2}{r}$$

$$(2) \quad T \cos\theta = mg$$

بالتعويض من (1) و (2):

$$\frac{T \sin\theta}{T \cos\theta} = \frac{\frac{mv^2}{r}}{mg}$$

$$\tan\theta = \frac{v^2}{rg}$$

نقطة

! بالنسبة لكرة تتحرك على السطح الداخلي الأملس لوعاء مخروطي، تتجه محصلة القوة العمودية والوزن نحو مركز المسار الدائري؛ وفي حالة مسار دائري نصف قطره r يميل سطحه المائل بزاوية θ على الأفقي (مما يجعل القوة العمودية تميل بالزاوية نفسها θ على الرأسي)، تكون العلاقة: $v^2 = gr \tan\theta$.

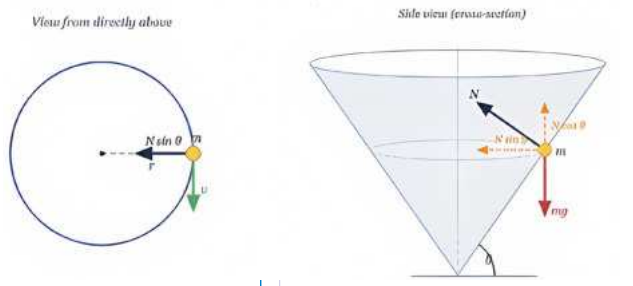
! لا تُعد الحركة في مسار دائري رأسي حركة دائرية منتظمة؛ إذ تكون السرعة في أقصى قيمتها عند أسفل المسار وفي أدنى قيمتها عند أعلاه، وتتغير قوة الشد تبعاً لذلك. لذا، ينبغي صياغة معادلة الحركة في اتجاه المركز عند كل لحظة.

! يتمكن الجسم بالكاد من تجاوز أعلى نقطة في المسار عندما تنخفض قوة الشد لتصبح صفرًا $(T = 0)$، وحينها يوفر الوزن وحده القوة الجاذبة المركزية؛ مما يؤدي إلى العلاقة: $v^2_{min} = gr$.

صندوق المعادلات:

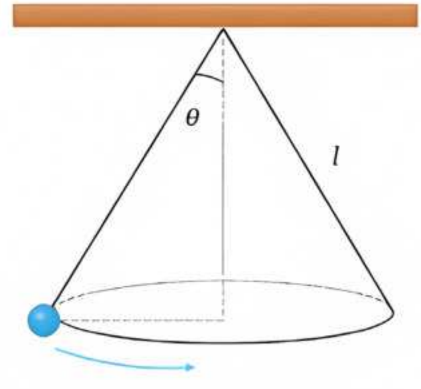
أقل قيمة لقوة الشد T (عند القمة)	$T = \frac{mv^2}{r} - mg$
أقصى قيمة لقوة الشد T (عند الأسفل)	$T = \frac{mv^2}{r} + mg$
أقل قيمة للسرعة (عند القمة)	$V_{min} = \sqrt{gr}$

مثال محلول:

الموقف:	تتحرك كرة صغيرة كتلتها m حركة دائرية منتظمة على السطح الداخلي الأملس لوعاء مخروطي. وتتحرك حركة دائرية أفقية في دائرة نصف قطرها r بسرعة v، ويصنع الخط المائل للمخروط زاوية θ مع الأفقي. أوجد سرعة الحركة وزمنها الدوري.
المعطيات والمطلوب:	المعطيات: الكتلة m، نصف القطر r، الزاوية θ، عجلة السقوط الحر g، سطح أملس. **المطلوب:** (أ) السرعة v (ب) الزمن الدوري T.
التمثيل:	تؤثر قوتان فقط على الكرة: وزنها mg (رأسيًّا إلى أسفل) وقوة رد الفعل العمودي N. حلِّل N إلى مركبة رأسية N cos θ ومركبة أفقية N sin θ؛ وتتجه المركبة الأفقية نحو المركز وتنشأ القوة المركزية المركزية.  View from directly above N sin θ m r v Side view (cross-section) N N cos θ N sin θ m mg θ
الاستراتيجية:	حلِّل القوى إلى اتجاهين أفقي ورأسي، وضع معادلة اتزان للاتجاه الرأسي، ومعادلة الحركة الدائرية المنتظمة للاتجاه الأفقي.
الحل الموضح:	(أ) الاتزان الرأسي: $N\cos\theta - mg = 0 \Rightarrow N = \dfrac{mg}{\cos\theta}$ الاتجاه القطرى (قانون نيوتن الثاني) $\dfrac{mv^2}{r} = N\sin\theta$ بالتعويض عن قيمة N $\dfrac{mv^2}{r} = \dfrac{mg}{\cos\theta}\sin\theta = mg\tan\theta$ $\Rightarrow v^2 = gr\tan\theta$ $v = \sqrt{gr\tan\theta}$ (ب) الزمن الدوري $T = \dfrac{2\pi r}{v} = \dfrac{2\pi r}{\sqrt{gr\tan\theta}} \Rightarrow T = 2\pi\sqrt{\dfrac{r}{g\tan\theta}}$ $T = 2\pi\sqrt{\dfrac{r}{g\tan\theta}}$
منطقية الحل:	السرعة مستقلة عن الكتلة، وهذا معقول لأن الوزن وقوة رد الفعل العمودي كلاهما يتناسب مع m فتُلغى. وتتفق الأبعاد مقدار v مع $\sqrt{gr\tan\theta}$ وهى وحدة سرعة (متر / ثانية) = (متر/ثانية 2x متر)، وتكون وحدة الزمن الدوري هي الثانية (s). تؤدي زيادة نصف القطر r إلى زيادة كل من السرعة v والزمن الدوري T، وهو أمر متوقع عند الحركة في مسار دائري أكبر.
فسِّرها بنفسك:	لماذا تبقى الكرة عند الارتفاع نفسه رغم أن قوة رد الفعل العمودي تؤثر بزاوية؟

جرِّب بنفسك: على طريق أملس يلتقي فيها منحدر بنصف دائرة رأسية نصف قطرها r عند أدنى نقطة A، تُترَك كرة صغيرة كتلتها m من السكون عند النقطة P على المنحدر، على ارتفاع h فوق A، وتتحرك حول المسار حتى أعلى نقطة B. أوجد سرعة الكرة v وهي تمر بأعلى نقطة B، بدلالة g و h و r.

حاول:



يُثبَّت أحد طرفَي خيط طوله [m] l في السقف، وتخضع كرة صغيرة كتلتها [kg] m مربوطة بالطرف الآخر لحركة دائرية منتظمة في مستوًى أفقي. لتكن الزاوية بين الخيط والاتجاه الرأسي θ، وعجلة الجاذبية الأرضية $[\mathrm{m\,s^{-2}}]$ g، ونسبة محيط الدائرة إلى قطرها π.

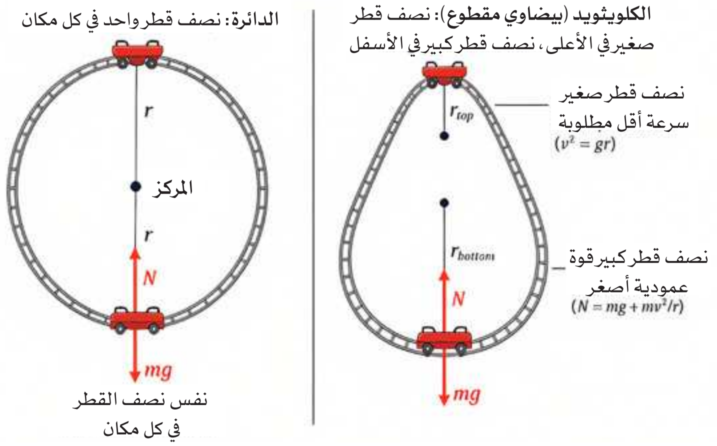
(i) أوجد مقدار الشد في الخيط بالنيوتن.

(ii) أوجد الزمن الدوري للحركة الدائرية بالثانية.

في سياق جديد — حلقة القطار الدوار (قطار الملاهي)

تُعد حلقة القطار الملاهي مثالًا على الحركة في المستوى الرأسي، مثل الماء في الدلو. لكن سرعة العربة تُحدد وفقًا لقانون حفظ الطاقة، لا وفقًا لما يحدده الراكب. تتميز الحلقة الدائرية بنصف قطر واحد في جميع أجزائها. عند قمة المسار الدائري، تحتاج العربة إلى اقل سرعة وتتعين من: $v^2 = gr$. وعند القاع، تتحرك بسرعة أكبر بكثير، لذا فإن المسار يدفع الركاب بقوة عمودية $N = mg + mv^2/r$ تبلغ حوالي ستة أضعاف وزنهم. أما الحلقات الحقيقية فتكون منحنيات إهليلجية بدلًا من ذلك. فنصف القطر الصغير عند الأعلى يقلل السرعة اللازمة هناك، ونصف القطر الكبير عند قاع المسار يقلل القوة – وهو ما لا يمكن لنصف قطر ثابت واحد تحقيقه.

شكلان للحلقة، مبدأ فيزيائي واحد


الدائرة: نصف قطر واحد في كل مكان
r
المركز
r
N
mg
نفس نصف القطر
في كل مكان
الكلويثويد (بيضاوي مقطوع): نصف قطر صغير في الأعلى، نصف قطر كبير في الأسفل
r_{top}
نصف قطر صغير
سرعة أقل مطلوبة
$(v^2 = gr)$
r_{bottom}
N
mg
نصف قطر كبير قوة
عمودية أصغر
$(N = mg + mv^2/r)$

فسِّر لماذا تُنتج عربة تحافظ بالكاد على التلامس مع المسار عند أعلى حلقة دائرية قوة رد فعل عمودي كبيرة على الركاب عند الأسفل.

طبيعة العلم: النماذج — القطار الدوار (قطار الملاهي)

تحسَّنت القطارات الدوارة المبكرة في كوني آيلاند سريعًا بعد تصاميم غير آمنة. ففي عام ١٨٩٥، قدَّمت «فليب-فلاب رايلواي» حلقة دائرية صغيرة كانت مثيرة لكنها غير مريحة وخطيرة. وفي

عام ١٩٠١، استخدمت «لوب-ذا-لوب» حلقة بيضاوية أكثر انسيابية لتقليل القوى على الركاب. ولاحقًا، أضافت «دروب-ذا-ديب» سرعات أعلى وقدّمت حواجز أمان للركاب من أجل السلامة.

دورك الآن: أي افتراض من افتراضات نموذج الحلقة الدائرية يُزال في حلقة متغيرة نصف القطر؟

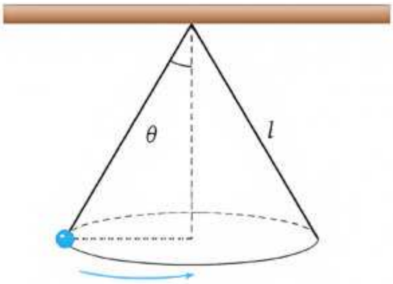
سؤال الدرس، وإجابته:

لماذا يمكن أن يبقى الماء داخل دلو عند أعلى نقطة في دائرة رأسية؟ عند أعلى الدائرة، يقع مركز المسار الدائري أسفل الماء، لذا يجب أن تتجه العجلة المركزية — وبالتالي القوة الشعاعية المحصلة على الماء — رأسيًّا إلى أسفل، نحو المركز. ويؤثر وزن الماء إلى أسفل، ويؤثر الدلو أيضًا بقوة رد فعل عمودي إلى أسفل طالما استمر التماس. وعند السرعة الدنيا اللازمة للحفاظ على التماس، يكون الماء على وشك فقدان التماس مع الدلو، لذا تكون قوة رد الفعل العمودي صفرًا. ويوفر وزن الماء وحده عندئذٍ القوة الشعاعية المحصلة اللازمة، مما يُعطي $v_{min} = \sqrt{gr}$. فإذا كانت $v \geq v_{min}$، يتبع الماء المسار الدائري ويبقى داخل الدلو؛ وإذا كانت $v < v_{min}$، يفقد التماس ويسقط.

حقيقة أساسية:

في الحركة الدائرية الرأسية، تتغيّر سرعة الجسم باستمرار وهو يتحرك حول الدائرة.

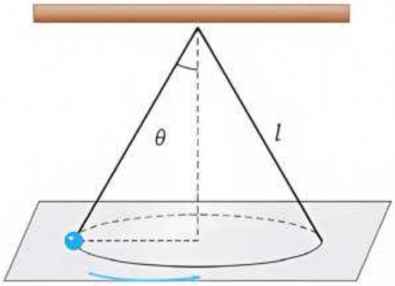
تمرين:



(أ) يُثبَّت أحد طرفَي خيط طوله l [m] في السقف، وتخضع كرة صغيرة كتلتها m [kg] مربوطة بالطرف الآخر لحركة دائرية منتظمة في مستوًى أفقي. لتكن الزاوية بين الخيط والاتجاه الرأسي θ، وعجلة الجاذبية الأرضية $g\,[\mathrm{m\,s^{-2}}]$، ونسبة محيط الدائرة إلى قطرها π.

(i) أوجد مقدار القوة المركزية بالنيوتن.

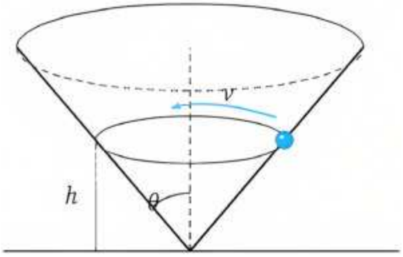
(ii) أوجد سرعة الكرة الصغيرة v بدلالة l و g و θ.



(ب) يُثبَّت أحد طرفَي خيط طوله l [m] في السقف، وتخضع كرة صغيرة كتلتها m [kg] مربوطة بالطرف الآخر لحركة دائرية منتظمة على مستوًى أفقي أملس بينما تتلقى قوة رد فعل عمودي من السطح. لتكن الزاوية بين الخيط والاتجاه الرأسي θ، والسرعة الزاوية $\omega\,[\mathrm{rad\,s^{-1}}]$، ومقدار عجلة الجاذبية الأرضية $g\,[\mathrm{m\,s^{-2}}]$.

(i) أوجد مقدار الشد في الخيط بالنيوتن.

(ii) أوجد مقدار قوة رد الفعل العمودي التي تتلقاها الكرة الصغيرة من المستوى الأفقي بالنيوتن.



(جـ) تخضع كرة صغيرة كتلتها m لحركة دائرية منتظمة على ارتفاع h داخل وعاء مخروطي بسطح داخلي أملس. لتكن الزاوية بين محور المخروط والخط المولِّد θ، ومقدار عجلة الجاذبية الأرضية g، ونسبة محيط الدائرة إلى قطرها π.

(i) أوجد مقدار قوة رد الفعل العمودي N التي تتلقاها الكرة الصغيرة من السطح المخروطي بدلالة m و θ و g.

(ii) أوجد سرعة الكرة الصغيرة v بدلالة h و g.

(iii) أوجد دور الحركة الدائرية T بدلالة h و θ و g.

سؤال بأسلوب الامتحان:

تُربَط كرة صغيرة كتلتها 0.50 kg بخيط وتتحرك في دائرة رأسية نصف قطرها 0.80 m. وعند أدنى نقطة في الدائرة، تكون سرعتها $4.0\,\mathrm{m\,s^{-1}}$. أوجد الشد في الخيط عند أدنى نقطة.

الدرس ١٢-١ — قوانين كبلر والجاذبية الكونية

؟ سؤال الدرس:

لماذا يبدو أحد الأقمار الصناعية ثابتًا فوق الأرض، وما الذي يحدد الزمن الذي يستغرقه القمر الصناعي لإتمام مداره؟

ستتعلم أن

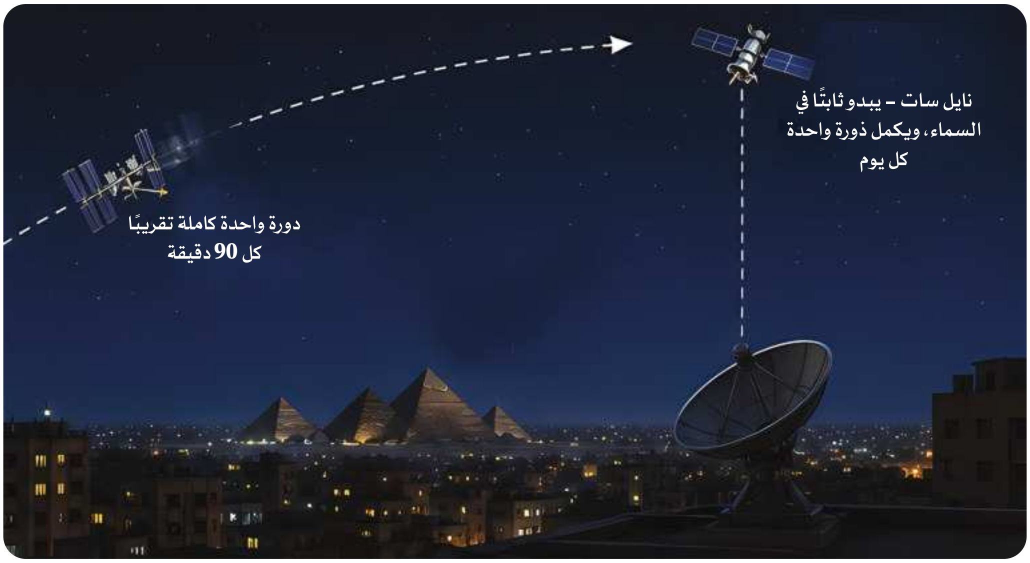
بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تصف** وتطبق قوانين كبلر لحركة الكواكب.

٢. **تفسر** كيف يعتمد الزمن الدوري المداري على نصف قطر المدار للكواكب والأقمار الصناعية.

٣. **تحدد** قوة الجاذبية وشدة مجال الجاذبية.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر


نايل سات – يبدو ثابتًا في السماء، ويكمل دورة واحدة كل يوم
دورة واحدة كاملة تقريبًا كل 90 دقيقة

حقيقة أساسية:

للحفاظ على جسم يتحرك في دائرة، يجب أن تتجه قوة محصلة إلى الداخل نحو المركز.

تأمّل السماء ليلًا: تبدو بعض الأقمار الصناعية ثابتة بالنسبة إلى سطح الأرض، بينما يتحرك بعضها الآخر بسرعة عبر السماء. وتتبع الكواكب أيضًا مدارات منتظمة حول الشمس، وقد دُرست حركتها لقرون. وهذه الحركات ليست عشوائية. فالجاذبية تُسارِع كل جسم باستمرار نحو الجسم الذي يدور حوله، بينما تدفعه سرعته المماسية إلى الأمام. ونتيجة لذلك، يبقى الجسم في سقوط حر مستمر، متبعًا مسارًا مداريًا منحنيًا بدلًا من السقوط مباشرة نحو الجسم المركزي.

توقَّع قبل أن تستمر :

(أ) ما الذي يحدد ما إذا كان القمر الصناعي يبدو ثابتًا بالنسبة إلى سطح الأرض أم يتحرك بسرعة عبر السماء؟

(ب) افترض أن السرعة اللحظية لقمر صناعي لم تتغيّر عندما تغيّرت قوة الجاذبية. كيف ستؤثر قوة جاذبية أقوى أو أضعف في مداره؟

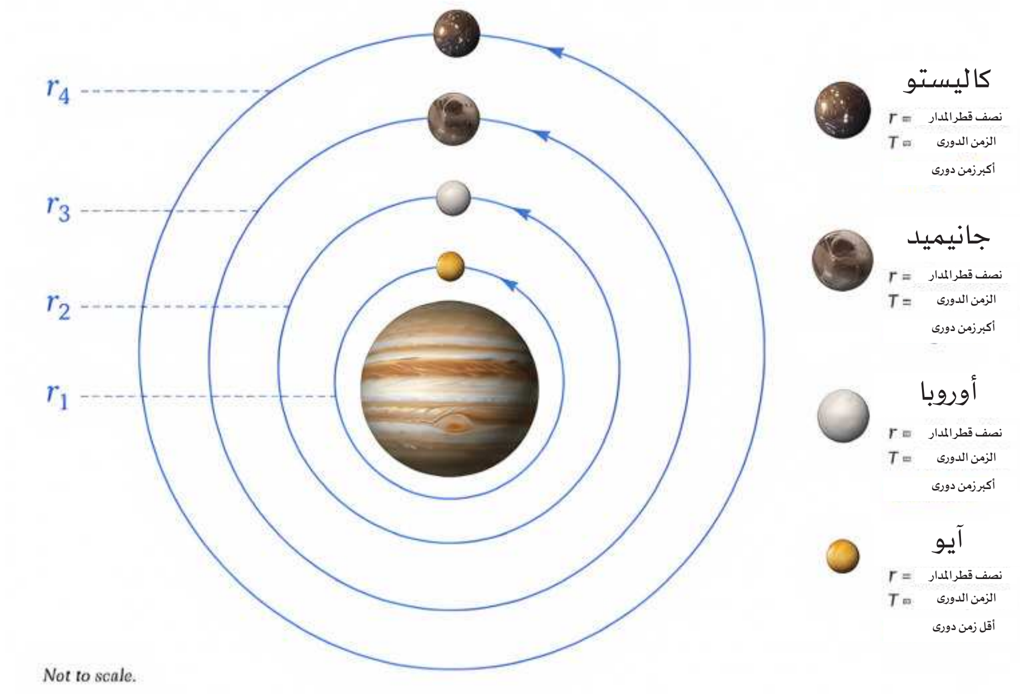
استكشف — استقصاء الحركة المدارية

ما ستفعله: تحلل أنصاف الأقطار المدارية والأزمنة الدورية لأكبر أربعة أقمار للمشتري لتحديد نمط رياضي

الزمن: 12 دقيقة

ما تحتاجه:

- الجدول المُعطى لنصف القطر الزمن الدوري (r) والدور المداري (T)
- آلة حاسبة


r_4
r_3
r_2
r_1
كاليستو
نصف قطر المدار $r =$
الزمن الدوري $T =$
أكبر زمن دوري
جانيميد
نصف قطر المدار $r =$
الزمن الدوري $T =$
أكبر زمن دوري
أوروبا
نصف قطر المدار $r =$
الزمن الدوري $T =$
أكبر زمن دوري
آيو
نصف قطر المدار $r =$
الزمن الدوري $T =$
أقل زمن دوري
Not to scale.

الخطوات:

١ استخدم قيم نصف القطر المداري r والزمن الدوري المداري T المُعطاة لكل قمر.

٢ لكل قمر، احسب T^2 وr^3 والنسبة $\frac{T^2}{r^3}$.

٣ سجّل قيمة $\frac{T^2}{r^3}$ المحسوبة في العمود الأخير من الجدول.

٤ قارن قيم $\frac{T^2}{r^3}$ للأقمار الأربعة جميعها.

القمر	نصف القطر المداري $r\,(\times 10^8\,\text{m})$	الزمن الدوري T (يوم)	$\frac{T^2}{r^3}$ (يوم^2 / m^3)
آيو (Io)	4.22	1.77	
أوروبا (Europa)	6.71	3.55	
جانيميد (Ganymede)	10.7	7.15	
كاليستو (Callisto)	18.8	16.7	

حلّل ما جمعته:

(أ) هل تبقى النسبة ثابتة تقريبًا للأقمار الأربعة، أم تتفاوت بشكل ملحوظ؟

(ب) أي خاصية للكوكب المركزي تحدد هذه القيمة الثابتة، وأي القوانين الفيزيائية تفسرها؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، حسبت $\frac{T^2}{r^3}$ لأكبر أربعة أقمار للمشتري. تختلف آيو وأوروبا وجانيميد وكاليستو في الحجم والسرعة والمسافة، ومع ذلك كانت القيم الأربع متطابقة تقريبًا. وتشير قيمة واحدة مشتركة بين أقمار مختلفة كهذه إلى كتلة مركزية مشتركة وقوة جاذبية تتناسب عكسيًّا مع مربع المسافة.

قانون نيوتن للجاذبية الكونية

تجذب كل جسيمة كل جسيمة أخرى على طول الخط الواصل بينهما؛ ويُسمى هذا الجذب القوة الجاذبية. ولكتلتين m_1 و m_2 تفصل بينهما مسافة r، تتناسب القوة طرديًّا مع حاصل ضرب الكتلتين وعكسيًّا مع مربع المسافة:

$$F = \frac{G m_1 m_2}{r^2}$$

حيث $G = 6.67 \times 10^{-11}\ \mathrm{Nm^2\,kg^{-2}}$ هو ثابت الجاذبية الكوني، وهو نفسه لجميع الأجسام.

حقيقة أساسية:
تشترك جميع الأجسام التي تدور حول الجسم المركزي نفسه في قيمة $\frac{T^2}{r^3}$ نفسها. وتعتمد هذه القيمة فقط على كتلة الجسم المركزي.

بناء النموذج

يدور قمر كتلته m حول المشتري (كتلته M) في دائرة نصف قطرها r بسرعة V. وتوفر قوة الجاذبية بينهما، GMm/r^2، القوة الجاذبة المركزية التي تُبقي القمر في مداره الدائري:

$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

تُلغى كتلة القمر، فتبقى سرعته المدارية:

$$V^2 = \frac{GM}{r} \qquad (1)$$

وفي زمن دوري واحد، يقطع القمر محيطًا واحدًا، لذا

$$\left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2 = \frac{GM}{r} = \frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM} \qquad (2)$$

وبالتعويض في (1) وإعادة الترتيب، نحصل على العلاقة ...(2).

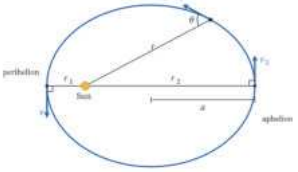
تفسير النتيجة

المعادلة (2) هي النمط الذي قمت بقياسه. ولا يحتوي الطرف الأيمن منها على أي خاصية خاصة بالقمر — بل يحتوي فقط على G والكتلة المركزية M. ولهذا السبب تشترك الأقمار الأربعة في قيمة واحدة، فهي جميعها تدور حول كوكب المشتري، وبالتالي فإن الثابت يحدده كتلة هذا الكوكب.

قوانين كبلر

العلاقة $T^2 \alpha r^3$ هي ثالث قوانين كبلر الثلاثة، واستُخلصت من بيانات حركة الكواكب قبل أن يفسرها نيوتن بزمن طويل.

القانون الأول. يتحرك كل كوكب في مسار بيضاوي (قطع ناقص) تقع الشمس عند إحدى بؤرتيه. وأطول قطر هو المحور الأكبر؛ ونصفه هو نصف المحور الأكبر a. وبالنسبة لمدار الأرض، يساوي a وحدة فلكية واحدة $(1\ \mathrm{AU} = 1.50 \times 10^{11}\ \mathrm{m})$.



القانون الثاني. يقطع متجه نصف القطر الممتد من الشمس إلى كوكب ما مساحات متساوية في أوقات متساوية، وبالتالي تظل السرعة المساحية ثابتة. ، فإن الزاوية θ بين متجه نصف القطر r ومتجه السرعة V، $\frac{1}{2} r \mathrm{V} \sin\theta = \frac{1}{2} r_1 \mathrm{V}_1 = \frac{1}{2} r_2 \mathrm{V}_2 = \text{constant}$ عند أقرب نقطة (r_1)، وعند أبعد نقطة (r_2)، تكون السرعة عمودية على متجه نصف القطر، لذا فإن: $\sin\theta = 1$ ، $r_1 \mathrm{V}_1 = r_2 \mathrm{V}_2$ ويتحرك الكوكب بسرعة أكبر كلما اقترب من الشمس.

القانون الثالث. مربع الزمن الدوري مقسومًا على مكعب نصف المحور الأكبر يساوي ثابتًا واحدًا لكل جسم يدور حول مركز معين: $\frac{T^2}{a^3} = k$

هذه هي المعادلة التي تم اشتقاقها أعلاه، حيث $k = 4\pi^2/GM$؛ وبالنسبة للمدار الدائري، فإن نصف المحور الأكبر يساوي نصف القطر r. ونظرًا لأن k هو ثابت مشترك، فإن أي جسمين يدوران حول نفس المركز يخضعان لـ

$$T_1^2/a_1^3 = T_2^2/a_2^3$$

نقطة

! قوانين كبلر

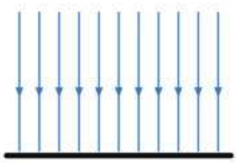
! القانون الأول: تتحرك الكواكب في مدارات بيضاوية (شكل قطع ناقص) تقع فيها الشمس عند إحدى البؤرتين. ويُطلق على طول نصف المحور الأكبر لمدار الأرض اسم "الوحدة الفلكية".

! القانون الثاني: تكون المساحة التي يمسحها متجه نصف القطر (الواصل بين الشمس والكوكب) في وحدة الزمن (أي السرعة المساحية) مقداراً ثابتاً؛ فإذا كان r هو متجه نصف القطر، وv هي السرعة، وθ هي الزاوية بينهما، فإن المقدار يساوي $\frac{1}{2} rv \sin\theta$. وعند أقرب نقطة للشمس تكون القيمة $\frac{1}{2} r_1 v_1$، وعند أبعد نقطة عن الشمس تكون $\frac{1}{2} r_2 v_2$، وبالتالي: $\frac{1}{2} r_2 v_2 = \frac{1}{2} r_1 v_1 = \frac{1}{2} rv \sin\theta$ (مع العلم أن $\sin 90° = 1$).

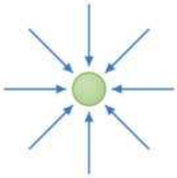
! القانون الثالث: النسبة بين مربع الزمن الدوري للكوكب (T) ومكعب نصف المحور الأكبر (a) لمداره البيضاوي (قطع ناقص) هي نسبة ثابتة لجميع الكواكب: $T^2/a^3 = k$ (حيث k ثابت).

قوة التجاذب بين أي جسمين هي قوة الجاذبية، وبالنسبة لكتلتين m1 وm2 تفصل بينهما مسافة r، تُحسب القوة بالعلاقة: $F = G m_1 m_2 / r^2$، حيث G هو ثابت الجاذبية العام $[\mathrm{N{\cdot}m^2/kg^2}]$.

حقيقة أساسية: تتجه خطوط مجال الجاذبية دائمًا نحو الكتلة التي تُنتج المجال، لأن الجاذبية جذب فقط دائمًا. وحيثما تتقارب الخطوط أكثر، يكون المجال أقوى.



مجال منتظم



مجال شعاعي

صندوق المعادلات:

الجاذبية الكونية:	$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$
السرعة المدارية:	$v^2 = \frac{GM}{r}$
قانون كبلر الثالث:	$\frac{T^2}{a^3} = k = \frac{4\pi^2}{GM}$
السرعة المساحية (القانون الثاني):	$\frac{1}{2} r_1 v_1 = \frac{1}{2} r_2 v_2$

مجالات الجاذبية

مجال القوة هو منطقة يتعرض فيها جسم لقوة غير تلامسية. ويمكن تمثيل مجال الجاذبية بمتجهات، تُظهر اتجاه المجال وقوته النسبية عند كل نقطة — وهو الاتجاه نفسه للقوة التي ستؤثر على كتلة توضع هناك. ويمكن تمثيله أيضًا بخطوط المجال، يُظهر اتجاهها اتجاه المجال، وكلما تقاربت، كان المجال أقوى في تلك المنطقة. و مجال الجاذبية هو مجال قوة يتعرض فيه أي جسم له كتلة لقوة.

شدة مجال الجاذبية

شدة مجال الجاذبية g عند نقطة هي قوة الجاذبية لوحدة الكتلة، تؤثر على كتلة اختبار توضع هناك: $g = \frac{F}{m}$. وهي كمية متجهة، تتجه على طول المجال، وتُقاس بوحدة نيوتن لكل كيلوجرام ($N\,kg^{-1}$، وتكافئ $m\,s^{-2}$). وبالنسبة لكتلة كروية M، يكون المجال شعاعيًّا، ويُعطى مقداره على بُعد r من المركز: $g = \frac{GM}{r^2}$. لذا فهو يخضع لقانون التربيع العكسي: فإذا تضاعفت المسافة عن مركز الكتلة، تقل g إلى ربع قيمتها.

وتُبيّن الأسهم على خطوط المجال اتجاه المجال، وهو اتجاه القوة المؤثرة على كتلة. وفي المجال المنتظم، تكون شدة المجال نفسها عند كل نقطة، لذا تكون خطوط المجال متوازية ومتساوية التباعد. وفي المجال الشعاعي، تعتمد شدة المجال على الموضع: فمع زيادة r، تتباعد خطوط المجال ويتناقص g. ومجال الجاذبية للأرض شعاعي؛ لكن في منطقة صغيرة قريبة من السطح، يكون شبه منتظم تقريبًا، ولهذا يمكن معاملة $g \approx 9.81\ N\,kg^{-1}$ كثابت هناك.

مثال محلول:

الموقف:	ثلاث مسائل مستقلة عن الجاذبية والحركة المدارية. (أ) يتحرك مذنَّب في مدار أهليليجي (قطع ناقص)، وتكون مسافته من الشمس عند أبعد نقطة 5.0 أضعاف مسافته عند أقرب نقطة. (ب) لمدار كويكب حول الشمس نصف محور أكبر مقداره 4.0 وحدة فلكية (AU). (ج) يوضع جسمان، كتلة كل منهما 60 kg، على بُعد 3.0 m
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** **المطلوب:** (أ) نسبة سرعة المذنَّب عند أبعد نقطة إلى سرعته عند أقرب نقطة. (ب) الدور المداري T للكويكب. (ج) مقدار القوة الجاذبية F بين الجسمين.
التمثيل:	
الاستراتيجية:	(أ) طبِّق قانون كبلر الثاني. (ب) طبِّق قانون كبلر الثالث، $T^2 \alpha a^3$. (ج) طبِّق قانون نيوتن للجاذبية الكونية، $F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$
الحل الموضح:	(أ) لتكن مسافة أقرب نقطة هي r ومسافة 5.0r عند أبعد نقطة . يُعطي قانون كبلر الثاني: $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{5.0} = 0.20$ (ب) بقانون كبلر الثالث: $0.8 = T \leftarrow T^2 = 64 \leftarrow T^2/(4.0)^3 = (1.0)^2/(1.0)^3$ سنة. (ج) $F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$ $F = \frac{(6.67 \times 10^{-11})(60)(60)}{(30)^2} = 2.67 \times 10^{-8} \approx 2.7 \times 10^{-8}\ N$ $F \approx 2.7 \times 10^{-8}\ N$

سؤال للربط:

لماذا لا تبذل القوة المحصلة الداخلية أي شغل على جسم يتحرك بسرعة ثابتة في دائرة؟

منطقة الحل:	يتحرك المذنَّب أسرع عند أقرب نقطة وأبطأ عند أبعد نقطة، كما يقتضي قانون كبلر الثاني. ويقابل المدار الأكبر زمنًا دوريًّا أطول، فالزمن الدوري لكويكب (مذنب) 8.0 سنة يتجاوز الزمن الدوري للأرض 1.0 سنة. قوة الجاذبية بين جسمين كتلتاهما عادية (جسمان بشريان على سبيل المثال) صغيرة للغاية.
فسِّرها بنفسك:	فسِّر، باستخدام قانون كبلر الثاني، لماذا يتحرك المذنَّب أسرع ما يمكن عند أقرب نقطة وأبطأ ما يمكن عند الأوج.

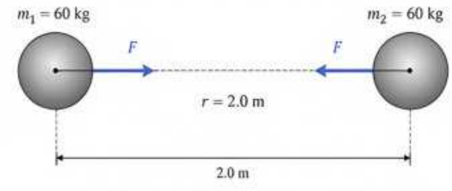
حاول بنفسك: احسب كتلة الشمس، مع العلم أن دور مدار الأرض حول الشمس هو 3.156×10^7 s ونصف المحور الأكبر لمدار الأرض هو 1.496×10^{11} m.

حاول:

(أ) عندما تكون مسافة مذنَّب من الشمس عند أبعد نقطة 2.5 وحدة فلكية، ومسافته من الشمس عند أقرب نقطة 1.5 وحدة فلكية، أوجد نسبة سرعته عند أبعد نقطة إلى سرعته عند أقرب نقطة.

(ب) نصف المحور الأكبر لمدار كويكب معيّن هو 16 وحدة فلكية. أوجد الدور المداري لهذا الكويكب.

(ج) يوضع جسمان، كتلة كل منهما 60 kg، على بُعد 2.0 m. أوجد مقدار قوة الجاذبية المؤثرة بين هذين الجسمين. ليكن ثابت الجاذبية $6.7 \times 10^{-11}\ \mathrm{N\,m^2\,kg^{-2}}$.

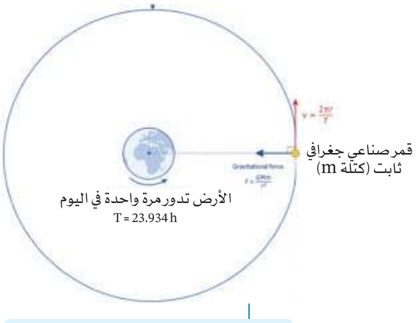


سؤال للربط:

كيف تُحدَّد كتلة كوكب من حركة قمر يدور حوله؟

في سياق جديد — المدار الثابت

المدار الجغرافي الثابت (في المستوى الأستوائي)



$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM} \quad \rightarrow \quad r = \sqrt[3]{\frac{GMT^2}{4\pi^2}}$$

يكون القمر الصناعي للاتصالات أكثر فائدة عندما يبقى فوق النقطة نفسها على خط الاستواء. ولتحقيق ذلك، يجب أن يدور حول الأرض في الزمن نفسه الذي تستغرقه الأرض لتدور دورة واحدة كاملة حول محورها، $T = 8.62 \cdot 10^4$ s (نحو يوم واحد). وتُبقي جاذبية الأرض قمرًا صناعيًّا في مداره الدائري: $\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$، لذا $v^2 = \frac{GM}{r}$. وبالتعويض $v = \frac{2\pi r}{T}$ نعود إلى $\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$.

وبإعادة الترتيب: $r = \sqrt[3]{\frac{GMT^2}{4\pi^2}} \approx 4.2 \cdot 10^7$ m، أي نحو $3.6 \cdot 10^7$ m فوق السطح. وعند نصف القطر هذا، $v = \frac{2\pi r}{T} \approx 3.1 \cdot 10^3\ \mathrm{m\,s^{-1}}$

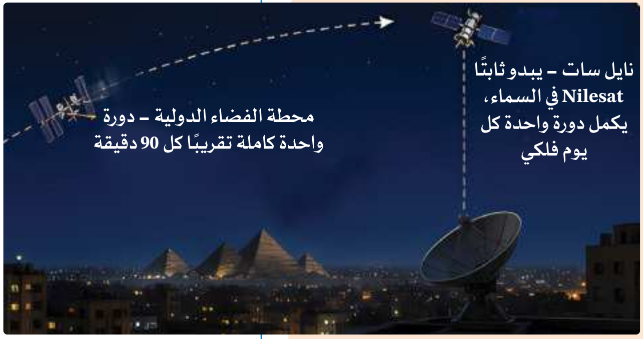
ولا يسمح إلا نصف القطر هذا وحده للقمر الصناعي بالدوران بالمعدل نفسه للأرض، فيبقى فوق النقطة نفسها. والقانون نفسه الذي يحكم الأزمنة الدورية لأقمار المشتري يحدد أيضًا مدار كل قمر صناعي تلفزيوني.

دورك الآن: فسِّر لماذا يحتاج صاروخ يُطلَق شرقًا بالقرب من خط الاستواء إلى سرعة إضافية أقل للوصول إلى مدار شرقي، مقارنة بصاروخ يُطلَق غربًا من موقع على خط عرض مرتفع.

طبيعة العلم: الأنماط والاتجاهات — القوانين التي انتظرت سبعين عامًا

لم يشتق كبلر قوانينه من نظرية للقوة. بل استنتجها من أنماط في ملاحظات تيخو براهي الدقيقة بالعين المجردة لحركة الكواكب. ونُشر القانونان الأول والثاني في كتاب «علم الفلك الجديد» عام ١٦٠٩، والقانون الثالث في كتاب «توافقيات العالم» عام ١٦١٩. ولنحو سبعين عامًا، ظلت هذه القوانين أوصافًا تجريبية موثوقة دون تفسير ديناميكي مقبول عمومًا. وفي كتابه «المبادئ» (١٦٨٧)، أوضح نيوتن كيف يمكن تفسيرها باستخدام قوانين الحركة والجاذبية الكونية. فقانون كبلر الثاني ينتج عن الاتجاه المركزي للقوة الجاذبية، بينما يعتمد القانونان الأول والثالث على تغيّرها العكسي التربيعي مع المسافة.

دورك الآن: اذكر تنبؤًا واحدًا سمح قانون كبلر الثالث لعلماء الفلك بتقديمه عن حركة كوكب مكتشَف حديثًا، قبل أن يقدم نيوتن تفسيرًا جاذبيًّا لهذه العلاقة.


نايل سات – يبدو ثابتًا Nilesat في السماء، يكمل دورة واحدة كل يوم فلكي

محطة الفضاء الدولية – دورة واحدة كاملة تقريبًا كل 90 دقيقة

سؤال الدرس، وإجابته:

لماذا يبدو أحد الأقمار الصناعية ثابتًا فوق الأرض، وما الذي يحدد الزمن اللازم لإتمام مداره؟ توفر قوة جاذبية الأرض القوة المركزية التي تُبقي القمر الصناعي في مداره. ويعتمد الدور المداري على نصف المحور الأكبر وكتلة الأرض. وبموجب قانون كبلر الثالث:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} a^3$$

ويتحرك القمر الصناعي الثابت بالنسبة للأرض في مدار دائري فوق خط استواء الأرض، في الاتجاه نفسه لدوران الأرض، وله دور مداري يساوي دور دوران الأرض. ونتيجة لذلك، يبقى فوق الموقع نفسه ويبدو ثابتًا في السماء. أما القمر الصناعي في مدار أخفض، مثل محطة الفضاء الدولية، فيسير في مدار أصغر، وبالتالي يُتم كل مدار في زمن أقصر.

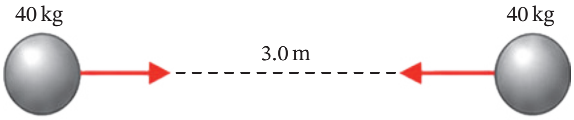
تمرين:

أوجد ما يلي:

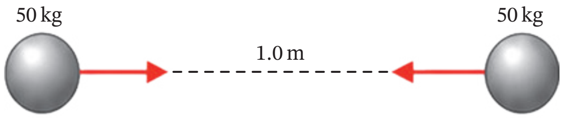
(أ) عندما تكون مسافة مذنَّب من الشمس عند أبعد نقطة 4.0 أضعاف مسافته من الشمس عند أقرب نقطة ، أوجد نسبة سرعته عند أبعد نقطة إلى سرعته عند أقرب نقطة .

(ب) نصف المحور الأكبر لمدار كويكب معيّن هو 9.0 وحدة فلكية. باستخدام حقيقة أن نصف المحور الأكبر لمدار الأرض هو 1.0 وحدة فلكية ودورها المداري 1.0 سنة، أوجد الزمن الدوري لهذا الكويكب.

(جـ) يوضع جسمان، كتلة كل منهما 40 kg، على بُعد 3.0 m. أوجد مقدار قوة الجاذبية المؤثرة بين هذين الجسمين. ليكن ثابت الجاذبية $6.7 \times 10^{-11}\ \text{N m}^2\,\text{kg}^{-2}$.



(د) يوضع جسمان، كتلة كل منهما 50 kg، على بُعد 1.0 m. أوجد مقدار قوة الجاذبية المؤثرة بين هذين الجسمين. ليكن ثابت الجاذبية $6.7 \times 10^{-11}\ \text{N m}^2\,\text{kg}^{-2}$.



الفصل الثاني

الحركة الاهتزازية والموجات

أسئلة إرشادية؟

- ما الذي يجعل حركةً تتكرر، وما الذي يحدد معدلها؟
- كيف تنقل الموجة طاقة دون أن تنقل مادة؟
- كيف تفسر مفاهيم الموجة نفسها كلا من الصوت والضوء؟

الدرس ٢-١ — الحركة التوافقية البسيطة

؟ سؤال الدرس:

تهتز المسطرة عندما يتم إزاحة طرفها الحر وتركه على حافة المكتب. ما الذي يحدد تردد هذا الاهتزاز؟

ستتعلم أن

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. تحدد الحركة التوافقية البسيطة من الشرط المحدد - قوة الاستعادة تتناسب طرديًّا مع الإزاحة وتتجه نحو موضع الاتزان.

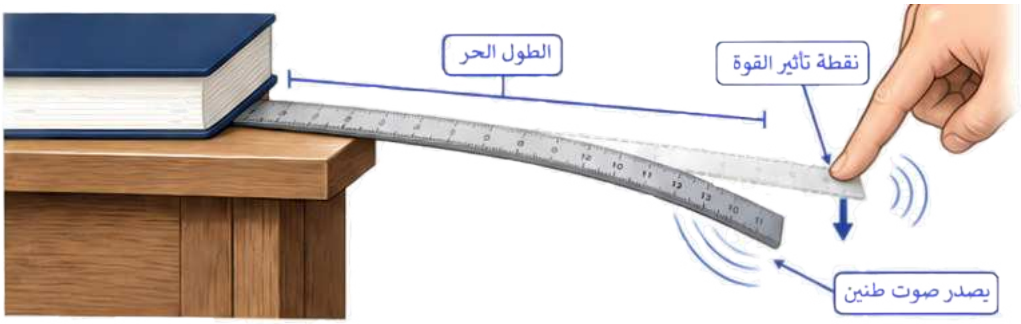
٢. تحدد الزمن الدوري للحركة التوافقية البسيطة، باستخدام:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad \text{و} \quad T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$$

حقيقة أساسية:

قوة الاستعادة هي قوة تؤثر نحو موضع الاتزان. وتوجد في كثير من الأنظمة، وللإزاحات الصغيرة، قوة الاستعادة تتناسب طرديا مع الإزاحة: $F = -kx$ حيث k هو ثابت القوة. (والاشارة السالبة تشير الى ان القوة تأثر فى عكس اتجاه الازاحة.)

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر



الشكل (1.1.2): مسطرة مُثبّتة أسفل مجموعة من الكتب تُصدر صوتًا رنانًا عند تحرير طرفها الحر.

- ثبّت مسطرة فولاذية مسطحة أسفل كتاب بحيث يمتد معظمها خارج حافة المكتب.
- اضغط الطرف الحر إلى أسفل واتركه: ستهتز إلى أعلى وأسفل وتُصدر نغمة ثابتة.
- حرّك المسطرة بحيث يبرز جزء أقل منها، اضغطها مرة أخرى، فترتفع درجة النغمة.
- مع أن المسطرة من المادة نفسها طوال الوقت — فقط الطول الحر هو الذي تغيَّر.

توقَّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) أثناء الاهتزاز، هل يتحرك طرف المسطرة بأقصى سرعة عندما يمر بموضع الاتزان أم عند نقطتَي (أقصى إزاحة يمينًا أويسارًا) ؟

(ب) عند نقطة (أقصى إزاحة يمينًا أويسارًا)، يكون الطرف ساكنًا للحظة. هل تكون قوة الاستعادة تساوي صفرًا عند هذه النقطة؟ فسِّر إجابتك.

استكشف — اجعل المسطرة تهتز وقِس الزمن الدوري

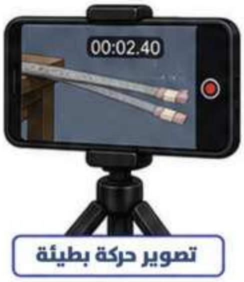
ما ستفعله: اجعل مسطرة مثبَّتة تهتز، واستخدم فيديو الحركة البطيئة لقياس الزمن الدوري.

ولاحظ كيف يؤثر الطول الحر من المسطرة في الزمن الدوري.

الزمن: 12 دقيقة.

ما تحتاجه:

- مسطرة صلبة أو نصل منشار حديد.
- ممحاة (أستيكة) كبيرة مثبَّتة بشريط على طرفها.
- كتاب ثقيل أو مشبك.
- هاتف بخاصية تصوير الحركة البطيئة.
- مكتب بحافة قائمة.



الشكل (2.1.2): يتيح التسجيل بالحركة البطيئة قياس الزمن الدوري بدقة أكبر

الخطوات:

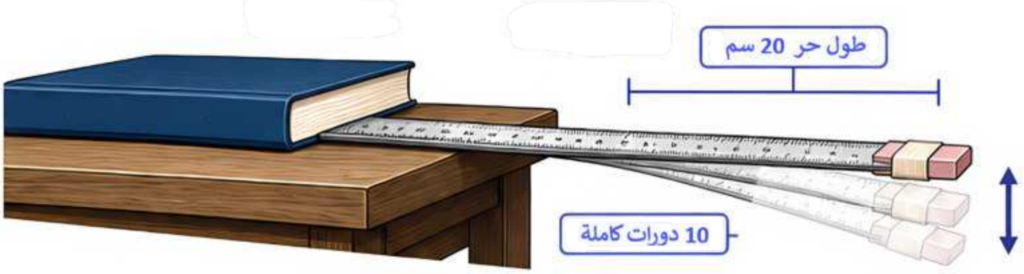
١ ثبِّت المحاة بشريط على الطرف الحر للمسطرة. ثبِّت المسطرة أسفل كتاب ثقيل بحيث يمتد نحو 20 cm خارج حافة المكتب.

٢ أزح الطرف الحر قليلًا إلى أسفل واتركه. سجِّل الحركة باستخدام فيديو الحركة البطيئة.

٣ استخدم مؤقت الفيديو لقياس الزمن اللازم لعشر اهتزازات كاملة تُعرَّف الاهتزازة الكاملة بأنها حركة الجسم من أحد الطرفين إلى الطرف الآخر ثم عودته إلى نفس الطرف الذي بدأ منه.

٤ قصِّر الطول الحر إلى نحو 12 cm مع إبقاء المحاة نفسها مثبَّتة، ثم كرر القياس.

٥ قارن الزمن المستغرق لعشر اهتزازات كاملة في الحالتين.



الشكل (3.1.2): قياس زمن عشر اهتزازات كاملة لمسطرة ذات طول حر قدره 20 cm

الطول الحر للمسطرة (cm)	الزمن لعشر اهتزازات كاملة (s)	موضع السرعة القصوى (المنتصف/نقطتا أقصى إزاحة)

حلِّل ما جمعته:

(أ) في فيديو الحركة البطيئة، أين كان طرف المسطرة يتحرك بأقصى سرعة: عند وضع الاتزان أم عند نقطتَي الانعطاف؟ ما سرعته في اللحظة التي غيَّر فيها اتجاهه؟

(ب) أي طول حر كان له الزمن الدوري الأقصر؟ ماذا يقترح هذا عن العلاقة بين الصلابة والكتلة والزمن الدوري؟

اكتب تفسيرك في سطرين على الأكثر قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

ملاحظة القياس:

قِس زمن عشر اهتزازات، لا اهتزازة واحدة. فالاهتزازة الواحدة سريعة جدًا على العين، وقياس عشر اهتزازات معًا يقلل عدم اليقين النسبي.

«وللسبب نفسه، تحتوي جداول البيانات التجريبية عادةً على عدة قياس.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، بلغ الطرف الحر سرعته القصوى وهو يمر بموضع الاتزان، وكان ساكنًا للحظة عند كل نقطة أقصى إزاحة. ولعلك توقعت العكس؛ لكن الملاحظة تشير إلى نتيجة مختلفة. كما أنهى الطول الأقصر عشر اهتزازات في زمن أقل. وفيما يلي النموذج الذي تؤيده أدلتك.

القوةُ التي تؤثر دائمًا نحو موضع الاتزان:

يؤدي جسم حركة توافقية بسيطة عندما تتناسب عجلته (a) طرديًا مع إزاحته (x) عن موضع الاتزان وتتجه نحو موضع الاتزان: $a = -\omega^2 x$. وبصورة مكافئة، إذا كانت قوة الاستعادة تتناسب طرديًا مع الإزاحة وتتجه نحو موضع الاتزان، فإن: $F = -kx$. حيث x هي الإزاحة من موضع الاتزان و k هو ثابت القوة. وموضع الاتزان هو مركز الاهتزاز. والسعة A هي أقصى إزاحة عن موضع الاتزان. والزمن الدوري T هو الزمن اللازم لعمل اهتزازة كاملة واحدة.

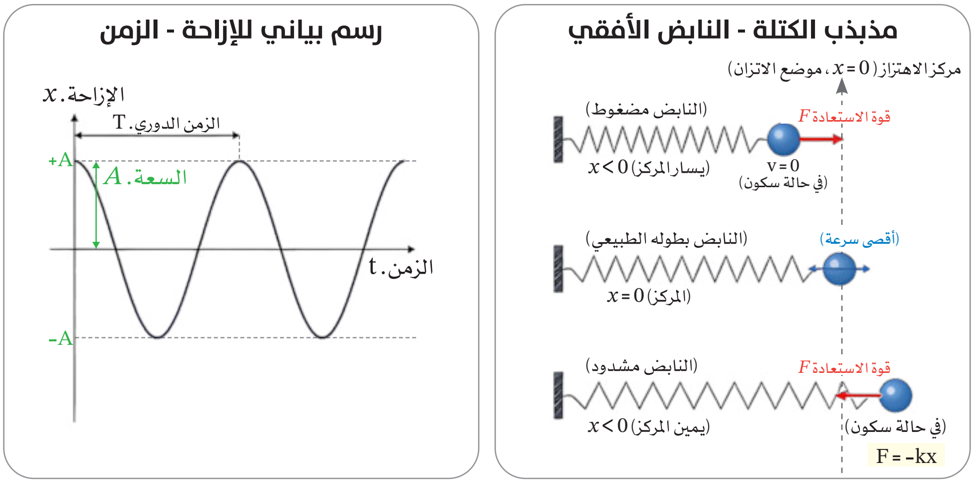
التردد الزاوي (السرعة الزاوية):

معدل حركة النقطة المرجعية حول دائرتها،

$T = \frac{2\pi}{\omega}$

ويُقاس بوحدة $rad\ s^{-1}$ ويشير إلى مدى سرعة تكرار الاهتزاز.

الحركة التوافقية البسيطة



مذبذب الكتلة - النابض الأفقي
مركز الاهتزاز ($x = 0$، موضع الاتزان)
(النابض مضغوط)
قوة الاستعادة F
$x < 0$ (يسار المركز)
v = 0
(في حالة سكون)
(النابض بطوله الطبيعي)
(أقصى سرعة)
$x = 0$ (المركز)
(النابض مشدود)
قوة الاستعادة F
$x < 0$ (يمين المركز)
(في حالة سكون)
F = -kx
رسم بياني للإزاحة - الزمن
الإزاحة. x
الزمن الدوري. T
+A
السعة. A
الزمن. t
-A

الشكل (4.1.2): الإزاحة مقابل الزمن، وقوة الاستعادة عند كل موضع.

التردد الزاوي (السرعة الزاوية) (ω):

يصف التردد الزاوي (ω) مدى سرعة تكرار الاهتزاز. ويرتبط بالزمن الدوري بالعلاقة: $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

ووحدة قياس التردد الزاوي في النظام الدولي هي $rad\ s^{-1}$، وتُكتب غالبًا s^{-1}؛ لأن الراديان بلا أبعاد.

نقطة

الحركة التوافقية البسيطة (Simple Harmonic Motion – SHM): هي اهتزازة تكون فيها العجلة تتناسب طرديًا مع الإزاحة عن موضع الاتزان، ومتجهًا دائمًا نحو موضع الاتزان.

السعة (Amplitude, A): هي أقصى إزاحة للجسم عن موضع الاتزان.

الزمن الدوري (Period, T): هو الزمن اللازم لإتمام اهتزازة كاملة، ووحدته الثانية (s).

التردد الزاوي (Angular Frequency, ω): هو معدل تغيّر الزاوية التي يقطعها الجسم في الحركة الدائرية المرجعية، ويُعطى بالعلاقة $\omega = \frac{2\pi}{T}$

العجلة ($a = -\omega^2 x$)

صندوق المعادلات:

العجلة :	$a = -\omega^2 x$
الزمن الدورى بمعلومية التردد الزاوى:	$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$

من الشرط المحدد إلى الزمن الدوري:

يُعطيك الشرط المحدد $a = -\omega^2 x$ الزمن الدوري أيضًا.

طبِّق قانون نيوتن الثاني على كتلة m مع قوة استعادة $F = -kx$ (حيث k هي القوة لوحدة الإزاحة).

$ma = -kx$ تُعطي:

$$-m\omega^2 x = -kx$$

$$\omega^2 = \frac{k}{m}$$

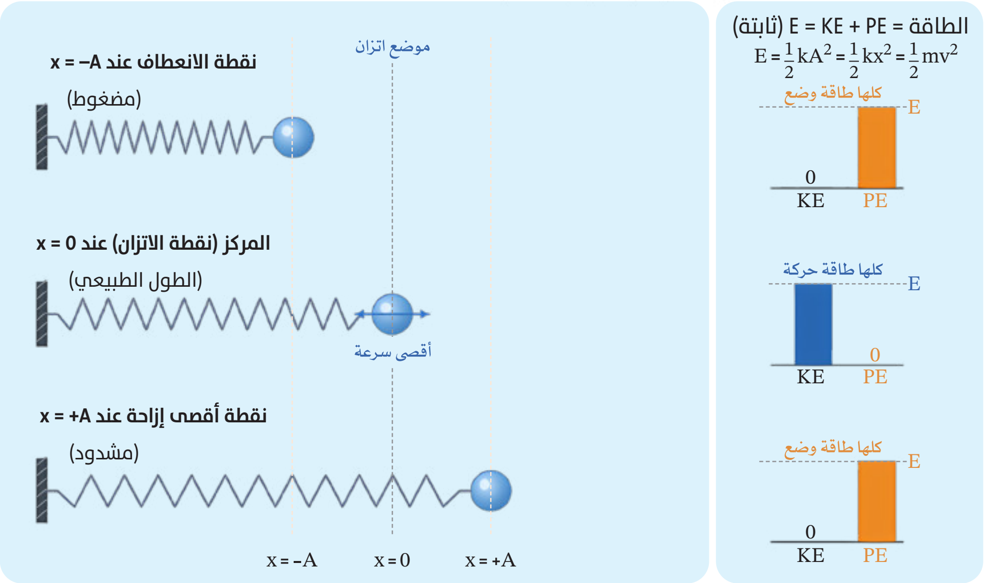
$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

صندوق المعادلات:

الزمن الدوري لنابض (الزنبرك) الكتلة المهتز:	$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

وعبر كل اهتزازة كاملة، تتبادل الحركة الطاقة أيضًا: فتُخزَّن بالكامل كطاقة وضع مرنة عند نقطتَي أقصى إزاحة، وتكون بالكامل طاقة حركية عند المركز (موضع الاتزان). ونتناول هذا التبادل كيفيًّا هنا — وستأتي الكميات لاحقًا.

الحركة التوافقية البسيطة _ تبادل الطاقة عند x − 0 ، A− + A+


الطاقة = E = KE + PE (ثابتة)
$E = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}mv^2$
موضع اتزان
نقطة الانعطاف عند x = −A
(مضغوط)
كلها طاقة وضع
E
0
KE
PE
المركز (نقطة الاتزان) عند x = 0
(الطول الطبيعي)
أقصى سرعة
كلها طاقة حركة
E
0
KE
PE
نقطة أقصى إزاحة عند x = +A
(مشدود)
كلها طاقة وضع
E
0
KE
PE
x = −A
x = 0
x = +A

الشكل (5.1.2): تتحول الطاقة بين الطاقة الحركية وطاقة الوضع، بينما يظل مجموعهما ثابتًا.

تطبيق سريع:

يهتز جسم كتلته 0.30 kg تحت تأثير قوة استعادة $F = -30x$، حيث x الإزاحة بالمتر. أوجد الزمن الدوري. (علمًا بأن: $\pi = 3.14$).

اختبر ذلك:

على رسم واحد للإزاحة – الزمن، حدِّد: أين تكون السرعة صفرًا وأين تكون العجلة صفرًا؟ وبيِّن أنهما لا يتطابقان أبدًا.

قراءة الزمن الدوري مباشرة من الحركة:

توجد طريقتان لتحديد الزمن الدوري. الأولى استخدمتها بالفعل: حدِّد قوة الاستعادة بالصيغة $F = -kx$، ثم $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$، $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

أما الطريقة الثانية فهي أكثر مباشرة. فأحيانًا تُعطى الحركة في صورة معادلة مكتوبة مسبقًا على أنها إزاحة تهتز مثل موجة جيبية حول موضع الاتزان — أي أن الموضع يساوي السعة مضروبة في جيب (التردد الزاوي مضروبًا في الزمن). ورمزيًّا، لجسم يمر بالمركز عند t = 0 بأقصى سرعة:

$$x = A\sin\omega t$$

كُتيِّب البيانات:

$a = -\omega^2 x$

$T = \frac{2\pi}{\omega}$

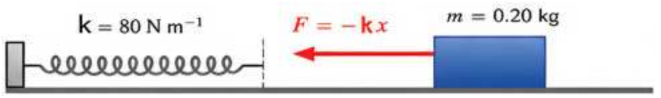
$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

جميعها معطيات؛

اقرأ k من $F = -kx$ المُعطاة.

فسِّر المعادلة. معامل دالة الجيب A هو السعة أو أقصى إزاحة عن موضع الاتزان. ومعامل t داخل دالة الجيب هو التردد الزاوي ω. وبمجرد أن تحدد ω، يُستنتج الزمن الدوري مباشرة من $T = \frac{2\pi}{\omega}$ — دون الحاجة إلى الكتلة أو قوة الاستعادة؛ لأن المعادلة تحتويهما بالفعل $\omega^2 = k/m$..

مثال محلول:

الموقف:	تنزلق قطعة صغيرة كتلتها 0.20 kg على مسار أفقي أملس. تشدها قوة استعادة نحو وضع الاتزان، $F = -kx$، حيث $k = 80\ \mathrm{N\ m^{-1}}$ و x الإزاحة بالمتر. علما بان $\pi = 3.14$. أوجد الزمن الدوري للاهتزاز.  الشكل (6.1.2): كتلة مقدارها 0.20 kg معلّقة بنابض ثابت صلابته 80 N/m.
المعطيات والمطلوب:	$m = 0.20\ \mathrm{kg}$، $k = 80\ \mathrm{N\ m^{-1}}$. $\pi = 3.14 \Leftarrow T = $ ؟
التمثيل:	تتناسب قوة الاستعادة طرديا مع الإزاحة واتجاها نحو موضع الاتزان، لذا فإن الحركة توافقية بسيطة.
الاستراتيجية:	اكتب قوة الاستعادة عند الإزاحة x بصورة $F = -kx$؛ فإذا انطبقت، تكون الحركة توافقية بسيطة، $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ و $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ أو عندما تُعطى لك معادلة الإزاحة مباشرةً، اقرأ القيمة ω منها مباشرةً، ثم احسب $T = \frac{2\pi}{\omega}$
الحل الموضح:	١) حدّد ثابت القوة: $k = 80\ \mathrm{N\ m^{-1}}$. ٢) أوجد التردد الزاوي: $\omega = \sqrt{\frac{80}{0.20}} = \sqrt{400} = 20\ \mathrm{rad\ s^{-1}}$ ٣) احسب الزمن الدوري: $T = \frac{2\pi}{20} = \frac{2\times3.14}{20} \Rightarrow T = 0.31\ \mathrm{s}$
منطقة الحل:	تحمل الزمن الدوري وحدة الزمن (s)، كما يجب؛ و $\omega = 20\ \mathrm{rad\ s^{-1}}$ اهتزاز سريع، و $T = 0.31\ \mathrm{s}$ يعني نحو ثلاث دورات في الثانية.
فسِّرها بنفسك:	لماذا تُعطي قوة استعادة أكثر صلابة (k أكبر)، مع بقاء الكتلة دون تغيير، زمنًا دوريًا أقصر؟

كُتيِّب البيانات:

كل عنصر هو تعويض مباشر واحد — إما إزاحة مكتوبة كدالة جيب أو قوة استعادة

$F = -kx$

$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$

$T = \frac{2\pi}{\omega}$

قرر أي صيغة يُعطيك إياها السؤال قبل أن تعوِّض بالأرقام.

جرِّب بنفسك: تتعرض قطعة كتلتها 0.80 kg على مسار أملس لقوة استعادة $F = -kx$ حيث $(\pi = 3.14)$ $k = 20\ \mathrm{Nm^{-1}}$. أوجد الزمن الدوري للاهتزاز.

حاول:

أوجد ما يلي لأقرب رقمين عشريين، علمًا بأن $\pi = 3.14$.

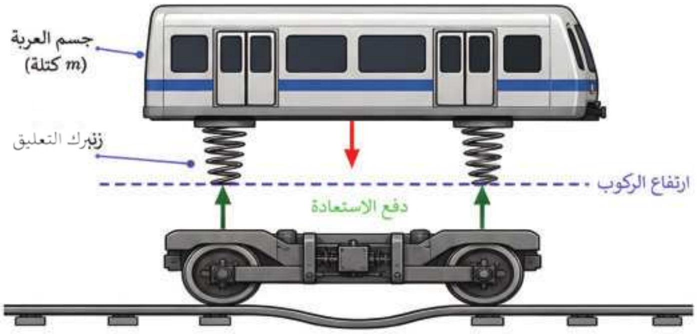
أ) إذا علمت أن الإزاحة x (m) لحركة توافقية بسيطة عند زمن t (s) تعطَى بالعلاقة $x = 0.50\, sin\,(8.0\,\pi t)$. أوجد سعتها A (m) والزمن الدوري T (s).

ب) يخضع جسم كتلته 0.50 kg لحركة توافقية بسيطة تحت تأثير قوة استعادة F (N) تعطَى بالعلاقة $F = -2.0\,x$، حيث x (m) الإزاحة. أوجد الزمن الدوري لهذه الحركة بالثانية.

في سياق جديد — نظام التعليق أسفل عربة مترو

تُدعَم كل عربة مترو بنوابض (زنبرك) تعليق، وعندما يتحرك جسم العربة إلى أسفل بالنسبة إلى مجموعة العجلات، تضغط النوابض. وتؤثر النوابض بقوة استعادة إلى أعلى نحو موضع الاتزان. وللإزاحات الرأسية الصغيرة، يمكن تقريب هذه الحركة بحركة توافقية بسيطة. ويعتمد الزمن الدوري على كتلة العربة وصلابة نوابض التعليق:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$



الشكل (7-1-2): يعمل نابض نظام التعليق على إعادة جسم السيارة إلى ارتفاعها الطبيعي أثناء السير

دورك الآن: لعربة محمَّلة بالكامل ستكون الكتلة m أكبر من عربة فارغة. باستخدام $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ توقَّع ما إذا كانت تهتز بزمن دوري أطول أم أقصر، وفسِّر لماذا يُعطي نابض أكثر صلابة (k أكبر) الأثر المعاكس.

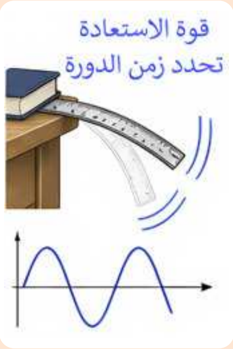
طبيعة العلم: العلم مسعى مشترك — القانون الذي أخفاه هوك في عبارة معكوسة الحروف

في عام ١٦٧٦، صاغ روبرت هوك قانونه على هيئة لغز حروفي لاتيني. وكشف عنه لاحقًا بعبارة: «ut tensio, sic vis»، أي: «كلما زادت الاستطالة، زادت القوة». وفي الصيغة الحديثة، تُعبِّر عن هذه الفكرة بالصيغة: $F = -kx$ بالنسبة لقوة الاستعادة التي تعمل في الاتجاه المعاكس للإزاحة.

سؤال الدرس، وإجابته:

تهتز المسطرة عندما تتم إزاحة طرفها الحر وتركه على حافة المكتب. ما الذي يحدد تردد هذا الاهتزاز؟

للإزاحات الصغيرة، تؤثر المسطرة بقوة استعادة تتناسب طرديًا تقريبًا مع الإزاحة وتتجه نحو موضع الاتزان. وينتج عن ذلك حركة توافقية بسيطة تُوصَف بـ: $a = -\omega^2 x$. ويعتمد تردد الاهتزاز على الصلابة الفعلية للمسطرة والكتلة المتحركة الفعلية. ويجعل تقصير الطول الحر للمسطرة أكثر صلابة فعليًا، فيزداد التردد الزاوي وينخفض الزمن الدوري $T = \frac{2\pi}{\omega}$. ونتيجة لذلك، ترتفع درجة النغمة الصوتية (تردد النغمة).



تمرين:

(أ) إزاحة $x(m)$ لحركة توافقية بسيطة عند زمن $t(s)$ هي $x = 0.20 \sin(4.0\,\pi t)$.
أوجد سعتها A (m) والزمن الدوري T (s).

(ب) يخضع جسم كتلته 0.50 kg لحركة توافقية بسيطة تحت تأثير قوة استعادة F (N) مُعطاة بالعلاقة $F = -50x$، حيث $x(m)$ الإزاحة. أوجد الزمن الدوري لهذه الحركة بالثانية.

(جـ) يخضع جسم كتلته 7.5 kg لحركة توافقية بسيطة تحت تأثير قوة استعادة F (N) مُعطاة بالعلاقة $F = -30x$، حيث $x(m)$ الإزاحة. أوجد الزمن الدوري لهذه الحركة بالثانية.

سؤال للربط:

كيف يمكن تطبيق فهم الحركة التوافقية البسيطة على نموذج الموجة؟

يُبنى نموذج الموجة على هذا: إذ تؤدي كل جسيمة في الوسط هذا الاهتزاز.

نصائح امتحانية:

اكتب سطر التعويض في كل إجابة — يمنح الممتحنون درجات على الطريقة، لا على الإجابة النهائية فقط.

سؤال بأسلوب الامتحان:

يخضع جسم كتلته 0.20 kg لحركة توافقية بسيطة تحت تأثير قوة استعادة $F = -kx$. وتُقاس عجلته بـ $a = -\omega^2 x$ حيث $\omega = 5.0\ \mathrm{rad\,s^{-1}}$

اذكر قيمة k، ثم أوجد الزمن الدوري لهذه الحركة.

(علمًا بأن $\pi = 3.14$).

الدرس ٢-٢ — البندول الزنبركي

؟ سؤال الدرس:

إذا تم ربط نفس الكتلة بنابض (زنبرك) رأسي (عمودى) بدلًا من نابض (زنبرك) أفقي، فهل تؤثر الجاذبية على الزمن الدورى للحركة الاهتزازية؟

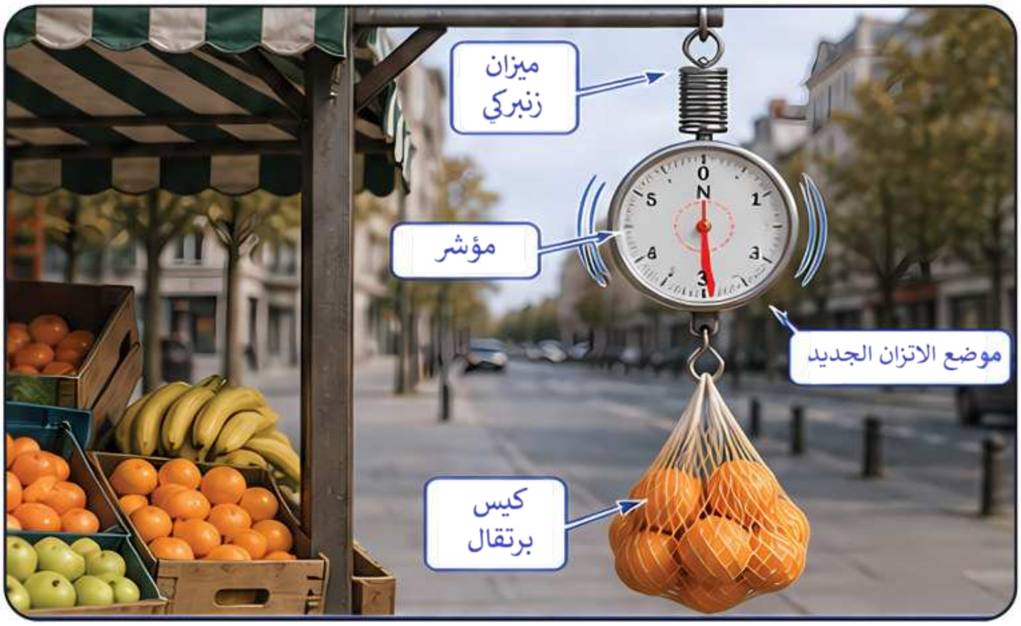
ستتعلم أن

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تحدد** الزمن الدوري لنابض (زنبرك) كتلة مهتز من العلاقة $T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

٢. **تثبت** أن الزنبرك المعلق عموديًا يحافظ على نفس الزمن الدوري الذى يحافظ عليه الزنبرك المعلق أفقيًا — وباختيار موضع الاتزان كأصل إحداثي، نحصل على قوة الاستعادة $F=-kx$.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر



شكل (1.2.2)

في كشك فاكهة، يُعلِّق البائع كيس برتقال على ميزان زنبركي (نابضي) معلَّق. يهبط المؤشر، ويتجاوز نقطة الاتزان، ثم يهتز إلى أعلى وأسفل حول قراءة جديدة قبل أن يستقر عندها. ولن يهتز الكيس نفسه على منضدة مستوية على الإطلاق — ومع ذلك وهو معلق، يهتز عدة مرات قبل أن يستقر.

توقَّع قبل أن تستمر:

(أ) عند ربط نفس الكتلة فى نفس الزنبرك الرأسي على سطح أفقي أملس. هل يهتز المتذبذب الرأسي بزمن دوري أبطأ أم أسرع أم ثابت لا يتغير؟

(ب) إذا سحبت الكيس إلى أسفل أكثر قبل تركه — سعة أكبر — فهل ستستغرق اهتزازة كاملة واحدة وقتًا أطول؟

حقيقة أساسية:

بالنسبة لمذبذب كتلة- نابض، الزمن الدوري هو:

$$T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

حيث m الكتلة وk ثابت الزنبرك (النابض).

يمكن تحديد ثابت النابض k من خلال قوة الاستعادة، F = -kx ثم استخدامه لتحديد الزمن الدوري

استكشف – ضع حملًا في الزنبرك (النابض) وقس الزمن الدوري

ما ستفعله: تضيف كتلًا مختلفة إلى نابض أو شريط مطاطي، وتقيس الاستطالة، وتحسب الزمن الدوري للاهتزاز.

الزمن: 12 دقيقة.

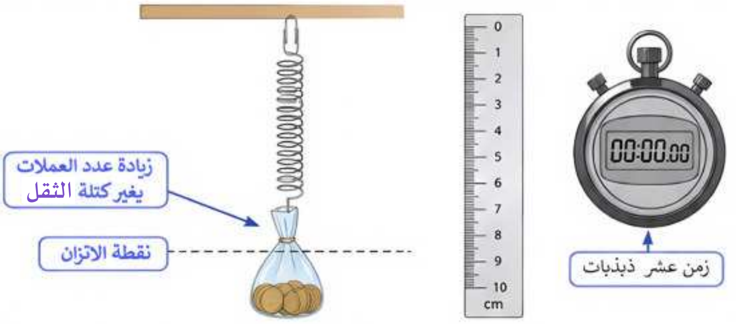
ما تحتاجه:

- نابض مرن أو شريط مطاطي.
- كيس صغير أو كوب ورقي مملوء جزئيًّا بعملات معدنية.
- مشبك ورق لتعليق الكتلة.
- مسطرة.
- ساعة توقيت
- دعامة ثابتة لتعليق النابض.

ملاحظة القياس:

قِس زمن عشر اهتزازات ثم اقسمه على عشرة، لا تقس زمن اهتزازة واحدة أبدًا: فالاهتزازة الواحدة سريعة جدًّا لتحديد زمنها بدقة.

تقليل نسبة عدم اليقين في التوقيت



شكل (2.2.2) : تؤدي إضافة العملات المعدنية إلى تغيير الحمل، ويتم قياس زمن عشر اهتزازات كاملة.

الخطوات:

① علِّق النابض من دعامة ثابتة وثبِّت الكيس الفارغ.

② أضف بعض العملات حتى يستطيل النابض بمقدار قابل للقياس. اترك النظام ليستقر. هذا الموضع هو وضع الاتزان.

③ اسحب الكيس إلى أسفل مسافة صغيرة واتركه برفق.

④ قِس الزمن اللازم لعشر اهتزازات كاملة تُعرَّف الاهتزازة الكاملة بأنها حركة الجسم من أحد الطرفين إلى الطرف الآخر ثم عودته إلى نفس الطرف الذي بدأ منه..

⑤ أضف مزيدًا من العملات، واترك النظام ليبلغ وضع اتزانه الجديد، وكرر القياس.

⑥ عُد إلى الثقل الأول. كرر القياس باستخدام إزاحة ابتدائية صغيرة ثم إزاحة ابتدائية أكبر، مع إبقاء الكتلة دون تغيير.

الكتلة (عدد العملات) (kg)	الإزاحة الابتدائية (cm)	الزمن لعشر اهتزازات كاملة (s)

حلِّل ما جمعته:

(أ) مع زيادة عدد العملات، هل زاد زمن عشر اهتزازات أم قلَّ؟ ما الذي يشير إليه هذا الاقتراح عن تأثير الكتلة على الزمن الدوري؟

(ب) بالنسبة لنفس الكتلة، هل أدت زيادة الإزاحة الابتدائية إلى تغيير بشكل ملحوظ في الزمن المستغرق لإجراء عشر اهتزازات؟ ما الذي يشير إليه ذلك الاقتراح عن اعتماد الزمن الدوري على السعة للاهتزازات الصغيرة؟

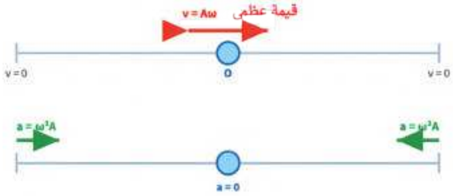
اكتب تفسيرك في سطرين على الأكثر قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، تُركت نتيجة واحدة جانبًا: فسحب الكيس إلى أسفل أكثر لم يغيِّر التوقيت إلا قليلًا تقريبًا. لكن بقاء الزمن الدوري دون تغيير لا يعني أن الحركة لم تتغير — فقد اجتاز السحب الأكبر المنتصف بسرعة أكبر بشكل ملحوظ وارتد بقوة أكبر. ولتسجيل الزمن الدوري بالكامل — مدى سرعتها، ومدى قوتها، والزمن الذي تستغرقه كل مرحلة — نضيف ثلاث كميات إلى النموذج الذي لديك بالفعل.

السرعة: أقصاها عند المركز (موضع الاتزان):

لقد صادفت هذا النمط من قبل: فمع المسطرة المهتزة في الدرس 1–2، اندفع الطرف عبر المنتصف ووقف ساكنًا للحظة عند كل طرف. تتغيّر السرعة المتجهة كـ $v = A\omega\cos\omega t$، لذا تكون السرعة أكبر ما يمكن عند المركز O، حيث $v_{max} = A\omega$، وتقل إلى الصفر عند كل طرف. ولهذا يجعل السحب أكبر — سعة A أكبر — الحركة أسرع، التأرجح أكبر، وبالتالي نفس الزمن الدوري. وبما أن $a = -\omega^2 x$، تكون العجلة صفرًا عند المركز، وأكبر ما يمكن عند الطرفين: $a_{max} = \omega^2 A$. لذا فإن السحب الأكبر ليس فقط أسرع عبر المنتصف، بل أيضًا ارتداد أقوى عند نقطتَي أقصى إزاحة (الطرفين).



شكل (3.2.2): تؤدي إضافة العملات المعدنية إلى تغيير الحمل، ويتم قياس زمن عشر اهتزازات كاملة.

تكون السرعة أكبر ما يمكن (max) عند المركز؛ وتكون العجلة أكبر ما يمكن (max) عند الطرفين. تؤدي السعة الأكبر إلى زيادة كل من السرعة والعجلة، ولكنها لا تؤدي إلى زيادة الزمن الدوري.

نقطة

! قوة الاستعادة والحركة التوافقية البسيطة:

تكون قوة الاستعادة التي تعيد الجسم نحو موضع الاتزان في عكس اتجاه الإزاحة X لذلك تكتب: $F = -kx\ (k>0)$، وباستخدام قانون نيوتن الثاني، تكون معادلة الحركة: $ma = -kx$

! إذا كانت معادلة الحركة $ma = -kx$، فإن الحركة تكون حركة توافقية بسيطة (SHM) السرعة والعجلة أثناء الاهتزاز. السرعة: $v = A\omega\cos\omega t$

! تكون السرعة أكبر ما يمكن عند موضع الاتزان:

$v_{max} = A\omega$ وتساوي صفرًا عند النهايتين

العجلة: $a = -\omega^2 x$ يكون التسارع صفرًا عند موضع الاتزان وتكون أكبر ما يمكن عند النهايتين

$amax = \omega^2 A$

الزمن الدوري: لا يعتمد على السعة. وبالتعويض عن: $a = -\omega^2 x$ نحصل على $ma = -kx$ في معادلة الحركة $T = 2\pi\sqrt{(m/k)}$.

عند تعليق وزن في نابض، يهتز الوزن حول موضع الاتزان، وليس حول الطول الطبيعي للنابض

صندوق المعادلات:

السرعة والعجلة في الحركة التوافقية البسيطة:	$v_{max} = A\omega$ ، $a_{max} = \omega^2 A$

حقيقة أساسية:

لا تؤثر سعة الاهتزاز في الزمن الدوري، لكنها تحدد الباقي:

$v_{max} = A\omega$

$\omega^2 A = a_{max}$

وتستغرق كل مرحلة من الطرف إلى المركز $\frac{T}{4}$.

كُتيِّب البيانات:

الصيغتان القياسيتان:

$v = \pm\omega\sqrt{(A^2 - x^2)}$

$a = \omega^2 x$

عند المركز:

$v = v_{max}$ ، $a = 0$؛

وعند الطرف:

$v = 0$ ، $a = a_{max}$.

حقيقة أساسية:

يحتاج الزمن الدوري فقط إلى m وk — اقرأ k من النابض، أو من اتزان السكون

$$x_o = \frac{mg}{k}$$

ثم

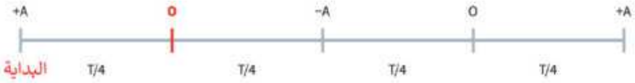
$T = \frac{2\pi}{\omega}$ ، $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$

قوة السحب الأولية هي السعة؛ وهي التي تحدد السرعة القصوى (v_{max}) والارتفاع القصوى (a_{max})، ولا تحدد أبدًا T

زمن الارجوحة:

تستغرق الدورة الكاملة زمنًا دوريًا T. وبحكم تناظر الأرجوحة، تستغرق كل مرحلة بين أحد الطرفين والوسط ربع الزمن الدوري. لذا، فإن الكيس الذي يُطلق من أحد الطرفين يصل أولًا إلى نقطة السكون O بعد

الزمن المستغرق من أحد الطرفين إلى الوسط (المركز / موضع الاتزان)	$t = \frac{1}{4}T = \frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{m}{k}}$



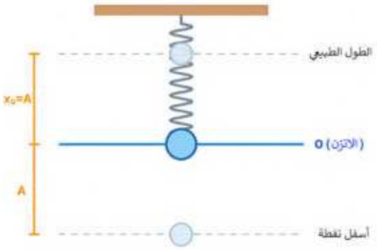
شكل (4.2.2) : تستغرق دورة كاملة أربع فترات رُبعية

الزنبرك (النابض) المعلَّق يحدد سعته الخاصة

أخبرنا النموذج بدراسة النابض المعلَّق بالنسبة لنقطة سكونه، على بُعد $x_\circ = \frac{mg}{k}$ أسفل الطول الطبيعي.

هذه الحقيقة وحدها تحدد السعة في التجربة المعتادة. ارفع الكيس حتى يعود الزنبرك إلى طوله الطبيعي، ثم أطلقه من حالة السكون: سيبدأ عند نقطة تقع بالضبط على ارتفاع x_o فوق النقطة O، وبالتالي فإن السعة تساوي $A = x_o$.

وتكون سرعته القصوى عند O عندئذٍ $v = A\omega = g\sqrt{\frac{m}{k}}$ وتقع النقطة الأدنى A أسفل O — أي عند استطالة قدرها $x_o + A = 2x_o$

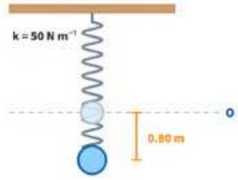
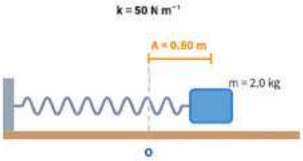


شكل (5.2.2) :
عند رفعه إلى الطول الطبيعي ثم تركه، تكون السعة مساوية لـ x_0 ويستمر التأرجح إلى $2x_0$ أسفل الطول الطبيعي

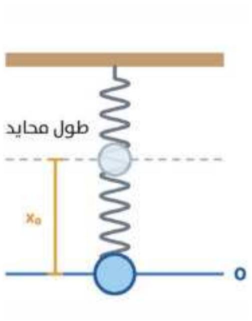
تطبيق سريع:

تُسحَب كتلة مقدارها 0.10 kg معلقة على نابض ثابته $k = 40\ N\ m^{-1}$ مسافة 0.050 m من نقطة سكونها وتُترَك ($\pi = 3.14$). أوجد سرعتها القصوى والزمن الذي تستغرقه لبلوغ نقطة الإتزان للمرة الاولى..

مثال محلول:

الموقف:	يحمل نابض مهمل الكتلة ثابته $k = 50\ N\ m^{-1}$ كتلة $m = 2.0\ kg$. يستقر أولًا على سطح أفقي أملس؛ ثم يُعلَّق النابض نفسه بالكتلة نفسها رأسيًا. وفي كل مرة، تُسحَب الكتلة 0.80 m من نقطة سكونها وتُترَك برفق. خذ $\pi = 3.14$ و $g = 9.8\ m\ s^{-2}$.  
المعطيات والمطلوب:	$m = 2.0\ kg$ ، $k = 50\ N\ m^{-1}$ ، $A = 0.80\ m$ ، $\pi = 3.14$ ، $g = 9.8\ m\ s^{-2}$ (أ) أفقيًا — الزمن الدوري، والسرعة عند O، وأقصى عجلة. (ب) النابض نفسه يكون معلَّقًا رأسيًا — الاستطالة x_o عند O، والزمن الدوري، والزمن المستغرق للوصول إلى O أولًا.
الاستراتيجية:	ابنِ كل شيء من محور واحد، و $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ثم $T = \frac{2\pi}{\omega}$ والسرعة عند O هي $A\omega = v_{max}$ ، وأقصى عجلة هي $\omega^2 A = a_{max}$. وبالنسبة للنابض الرأسي، أوجد $x_o = \frac{mg}{k}$.

الحل الموضح:	(أ) أفقيًّا: 1. $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{50}{2.0}} = \sqrt{25} = 5.0\ \text{rad}\ s^{-1}$ 2. $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\times3.14}{5.0} = 1.256 \Rightarrow T = 1.3\ \text{s}$ 3. $\text{v}_{\text{max}} = A\omega = 0.80 \times 5.0 = 4.0\ \text{m}\ s^{-1}$ 4. $a_{\text{max}} = \omega^2 A = 5.0^2 \times 0.80 = 20\ \text{m}\ s^{-2}$ (ب) رأسيًّا: 5. $kx_0 = mg \Rightarrow x_0 = \frac{mg}{k} = \frac{2.0\times9.8}{50} = 0.39\ \text{m}$ **6.** والقوة تحافظ على الصيغة $F = mg - k(x + x_0) = -kx$، لذا: $a_{max} = 20\ m\ s^{-2}$ ، $v_{max} = 4.0\ m\ s^{-1}$ ، $T = 1.3\ s$ **7.** الزمن لبلوغ O أولًا: $t = \frac{T}{4} = \frac{1.256}{4} = 0.314\ \text{s} \approx 0.31\ \text{s}$
منطقية الحل:	يشترك الإعدادان في m و k و A نفسها، لذا يشتركان في الزمن الدوري نفسه وأقصى سرعة وأقصى عجلة؛ وخفضت الجاذبية المركز فقط بمقدار $x_0 = 0.39\ m$.
فسِّرها بنفسك:	لماذا يُغيِّر تعليق النابض موضع سكون الكتلة (بمقدار x_0) لكنه يترك الزمن الدوري وأقصى سرعة وأقصى عجلة دون تغيير؟



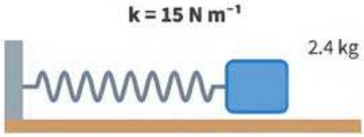
جرِّب بنفسك: تتدلى كتلة $m = 0.20\ kg$ من نابض ثابتة $k = 80\ N\ m^{-1}$ وتهتز حول وضع اتزانها ($\pi = 3.14$). أوجد الزمن الدوري للاهتزاز.

سؤال للربط:
كيف تبني الحركة التوافقية البسيطة لجسيم نموذج الموجة؟

حاول:

أوجد ما يلي لأقرب رقمين عشريين، بأخذ $\pi = 3.14$ و $g = 9.8\ m\ s^{-2}$.

(أ) يُثبَّت أحد طرفَي نابض خفيف ثابته $k = 15\ N/m$ في جدار على سطح أفقي أملس، وتُربَط قطعة كتلتها 2.4 kg بالطرف الآخر. تُسحَب القطعة قليلًا عن طولها الطبيعي وتُترَك برفق. أوجد الزمن الدوري بالثانية.



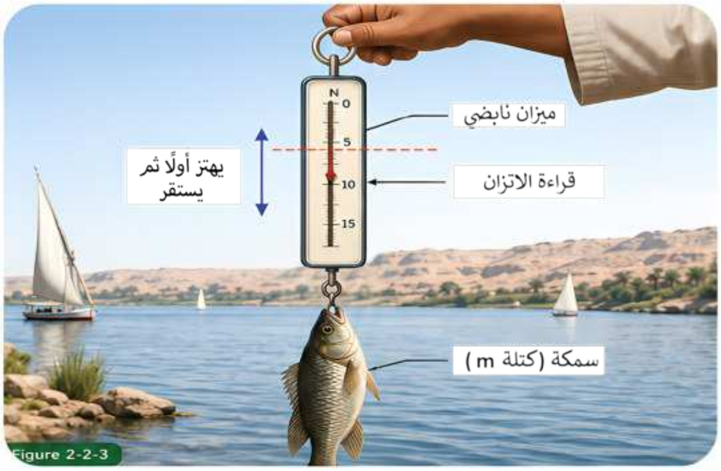
(ب) يُثبَّت الطرف العلوي لنابض مهمل الكتلة في السقف، وتُربَط كتلة m بالطرف السفلي؛ وتتزن عند نقطة O حيث يستطيل النابض بمقدار x_0 عن طوله الطبيعي. ثم تُرفَع الكتلة حتى يبلغ النابض طوله الطبيعي وتُترَك برفق، فتخضع لحركة توافقية بسيطة.

(i) أوجد ثابت النابض k (بدلالة m و g و x_0).

(ii) أوجد السرعة V عندما تمر الكتلة بـ O.

في سياق جديد — ميزان نابضي (زنبركي) لصياد عند بحيرة ناصر

يُثبِّت صياد عند بحيرة ناصر سمكة في ميزان زنبركي يُحمَل باليد. يتحرك المؤشر إلى أسفل ويهتز حول وضع الاتزان قبل أن يستقر. وتشد السمكة الزنبرك حتى توازن قوة الزنبرك الصاعدة وزنها. ويمكن نمذجة كل اهتزازة صغيرة حول وضع الاتزان بوصفها حركة توافقية بسيطة. والزمن الدوري هو $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ وتحدد الجاذبية قراءة الاتزان، بينما يعتمد الزمن الدوري على m وk.



السمكة الأكبر وزنًا لها كتلة أكبر m. باستخدام $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ توقَّع ما إذا كانت السمكة تهتز بزمن دوري أطول أم أقصر. واشرح لماذا يؤدي النابض (الزنبرك) الأكثر صلابة، الذي له قيمة k أكبر، إلى تغيير معاكس في قيمة الزمن الدوري

طبيعة العلم — العلم مسعى مشترك — الساعة التي حافظت على دقة التوقيت في البحر

تعتمد ساعة التي بها بندول على الجاذبية؛ لأن الزمن الدوري للبندول البسيط تعتمد على g. وعلى سفينة تتمايل، يمكن أن تؤثر التغيرات في المجال الجاذبي الفعلي في حركة ساعة البندول. واستخدمت أجهزة توقيت بحرية طوَّرها جون هاريسون مذبذبات يتحكم فيها نابض بدلًا من البندولات، مما جعلها أكثر ملاءمة للاستخدام في البحر.

دورك الآن: اقترح سببًا واحدًا يجعل جهاز توقيت يتحكم فيه نابض الخيار الأفضل لسفينة تتمايل.

اربط سببك بنتيجة هذا الدرس.

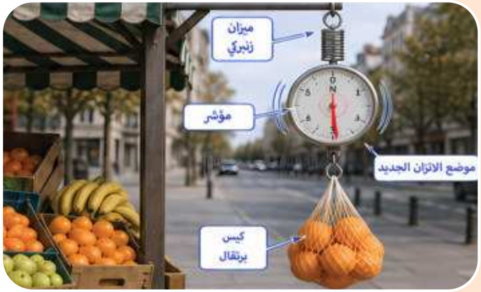
حدد ثابت الزنبرك k من المعادلة $x_o = \frac{mg}{k}$ ، ثم **حدد** الزمن الدوري للاهتزاز

نصيحة امتحانية:

— السحب الابتدائي هو السعة يحدد v_{max} وa_{max}، لكن ليس الدور أبدًا.

اعرض كل سطر تعويض.

سؤال الدرس، وإجابته:



ربط الكتلة نفسها بنابض رأسي بدلًا من نابض أفقي لا يُغيِّر الزمن الدوري، شريطة أن يكون ثابت النابض نفسه والاهتزازات صغيرة. في الحالة الرأسية، تُزيح الجاذبية وضع الاتزان إلى أسفل. وعند الاتزان، $kx_o = mg$.

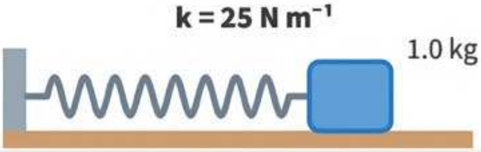
وعندما تُقاس الإزاحة من موضع الاتزان هذا، تكون القوة المحصلة $F = -kx$.

لذا، $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ و$T = \frac{2\pi}{\omega}$ ولذلك، يكون للنظامين الرأسي والأفقي الزمن الدوري نفسه لقيم m وk نفسيهما. ولا يعتمد الزمن الدوري على g.

اختر وضع الاتزان أصلًا لإحداثياتك، وسيكون للنابض المعلَّق نفس الزمن الدوري للنابض الأفقي: الكتلة نفسها، وثابت النابض نفسه، والزمن الدوري نفسه.

تمرين:

أوجد ما يلي لأقرب رقمين عشريين، بأخذ $\pi = 3.14$ و $g = 9.8\ \mathrm{m\,s^{-2}}$.



(أ) يُثبَّت نابض خفيف ثابته $K = 25\ \mathrm{N\,M^{-1}}$ في جدار على سطح أفقي أملس، مع قطعة كتلتها 1.0 kg على الطرف الآخر. تُسحَب قليلًا عن طولها الطبيعي وتُترَك برفق. أوجد الزمن الدوري بالثانية.

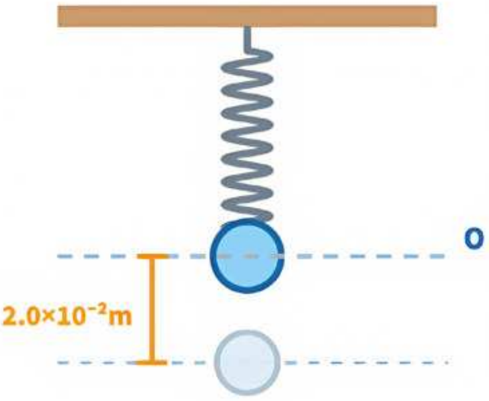
(ب) قطعة كتلتها 0.80 kg على الطرف الآخر. تُسحَب القطعة إلى نقطة على بُعد 0.20 m من نقطة اتزانها O وتُترَك برفق.

(i) أوجد الزمن الدوري بالثانية.

(ii) أوجد السرعة عندما تمر بـ O بوحدة $\mathrm{m\,s^{-1}}$.

(iii) أوجد أقصى مقدار للعجلة بوحدة $\mathrm{m\,s^{-2}}$.

(جـ) يُثبَّت الطرف العلوي لنابض خفيف ثابته $k = 9.8\ \mathrm{N\,m^{-1}}$، وتتدلى كتلة m 2.0×10^{-2} من الطرف السفلي. تُسحَب الكتلة إلى أسفل $2.0 \times 10^{-2}\ \mathrm{m}$ عن الاتزان وتُترَك. أوجد السعة، والزمن الدوري، والسرعة القصوى.



(د) يُثبَّت الطرف العلوي لنابض مهمل الكتلة ثابته k، وتتدلى كتلة m من الطرف السفلي. تُترَك الكتلة من السكون عند الموضع الذي يكون فيه النابض بطوله الطبيعي، فتخضع لحركة توافقية بسيطة.

(i) أوجد السعة، والزمن الدوري، والسرعة القصوى.

(ii) أوجد استطالة النابض عند أدنى نقطة.

(iii) أوجد الزمن المستغرق من الإطلاق حتى أول مرور بمركز الاهتزاز.

(هـ) يُثبَّت نابض مهمل الكتلة في السقف وتتدلى منه كتلة m، متزنة عند O، حيث يستطيل النابض بمقدار x_0. تُسحَب إلى أسفل مسافة d عن O وتُترَك برفق، فتهتز رأسيًّا. أوجد السرعة عندما تمر بـ O (بدلالة d و g و x_0).

سؤال بأسلوب الامتحان:

تتدلى كتلة مقدارها 0.20 kg من نابض خفيف، فتستطيله بمقدار $x_0 = 0.049\ \mathrm{m}$ عند السكون.

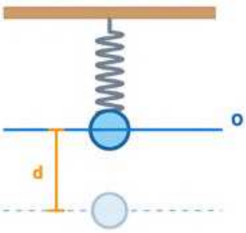
خذ $\pi = 3.14$، $g = 9.8\ \mathrm{m\,s^{-2}}$

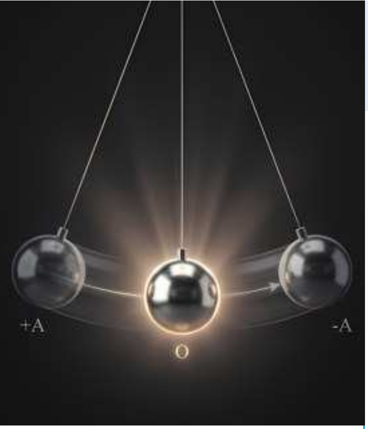
- أوجد ثابت النابض
- الزمن الدوري للاهتزازات الرأسية الصغيرة.

نصيحة امتحانية:

السحب الابتدائي: هو السعة - يحدد v_{max} و a_{max}، لكن ليس الدور أبدًا.

اعرض كل سطر تعويض.





الدرس ٢-٣ — البندول البسيط

؟ سؤال الدرس:

هل تؤثر كتلة الثقل أو مقدار الإزاحة الابتدائية الصغيرة في الزمن الدوري للبندول البسيط؟

ستتعلم أن

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تحدد** الزمن الدوري لبندول بسيط باستخدام $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ للإزاحات الزاوية الصغيرة.

٢. **تفسر:** لماذا يعتمد الزمن الدوري للبندول البسيط على L و g، لكن ليس على كتلة الثقل؟

٣. **تفسر:** لماذا يكون الزمن الدوري مستقل تقريبًا عن السعة للاهتزازات الصغيرة؟

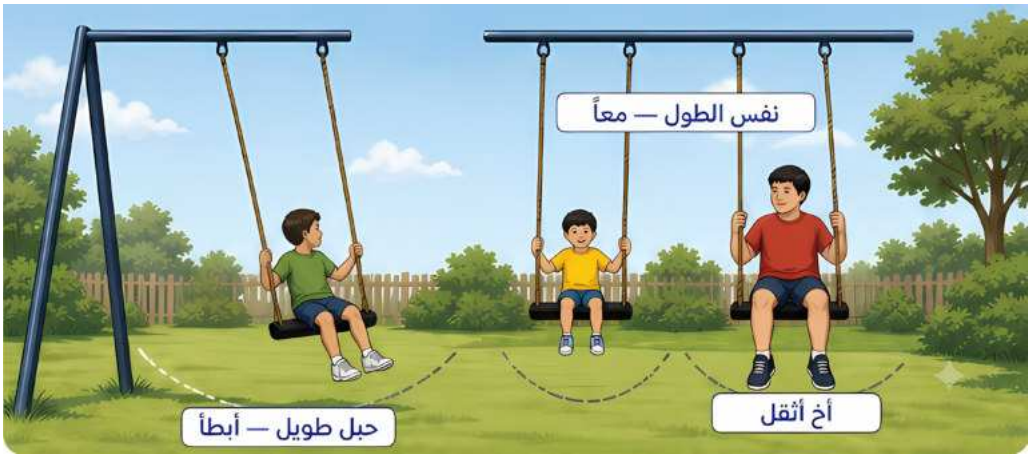
⭐ حقيقة أساسية:

تكون الحركة توافقية بسيطة عندما تتناسب قوة الاستعادة طرديًا مع الإزاحة عن موضع الاتزان وتتجه عكسها: $F = -kx$.

ولنظام كتلته m حيث k هو ثابت القوة الفعالة.،

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

الظاهرة — توقّع قبل أن تستمر



في حديقة، تتدلى أرجوحتان جنبًا إلى جنب من العارضة نفسها، بحبال لها الطول نفسه. يجلس طفل صغير على إحداهما، وأخوه الأكبر والأثقل على الأخرى. يُطلَقان – اهتزازة تلو الأخرى – يبقيان معًا، جنبًا إلى جنب. وفي الحديقة، توجد أرجوحة أخرى بحبل أطول ولها الزمن الدوري أطول: فهي تستغرق وقتًا أطول لإتمام اهتزازة واحدة.

توقّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) الأخ الأثقل. هل ستستغرق أرجوحته وقتًا أطول، أم أقصر، أم نفس الوقت لكل اهتزازة مقارنة بأرجوحة الطفل الأخف، على حبلين متساويين؟

(ب) ادفع إحدى الأرجوحتين بقوة أكبر بحيث تصنع قوسًا أوسع. هل تستغرق الاهتزازة الواحدة الآن وقتًا أطول أم أقصر أم نفس الوقت؟

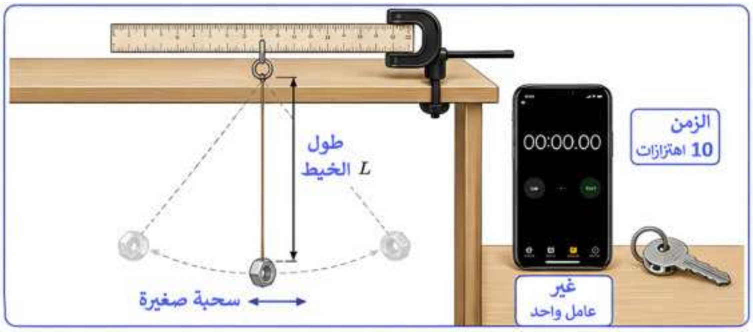
استكشف — قِس الزمن الدوري مع تغيير متغيّر واحد

ما ستفعله: تُغيِّر متغيّرًا واحدًا في كل مرة: طول البندول، أو كتلة الثقل، أو الإزاحة الابتدائية، وتقيس الزمن الدوري الحركة الاهتزازية.

الزمن: 20 دقيقة.

ما تحتاجه:

- خيط طوله 1–2 m.
- ثقل ثانٍ بكتلة مختلفة.
- ساعة توقيت أو مؤقت هاتف.
- جسم صغير كثيف ليكون ثقل البندول.
- دعامة ثابتة.
- مسطرة مسطحة طولها متر.



الشكل (2.3.2): يُقاس طول الخيط، ويُقاس الزمن اللازم لحدوث عشر ذبذبات كاملة.

الخطوات:

١ اربط الثقل بالخيط وعلِّقه من دعامة ثابتة. قِس الطول (L) من نقطة التعليق إلى مركز الثقل.

٢ أزح الثقل بزاوية صغيرة واتركه دون دفع.

٣ قِس الزمن اللازم لعشر اهتزازات كاملة.

٤ الاهتزازة الكاملة هي الحركة من أحد الموضعين (أقصى إزاحة) والعودة إلى نفس الموضع.

٥ اقسم الزمن المقاس على 10 للحصول على الزمن الدوري (T).

٦ كرر القياس بعد تغيير الطول فقط.

٧ كرر القياس بعد تغيير كتلة الثقل فقط.

٨ كرر القياس بعد تغيير الإزاحة الابتدائية فقط، مع إبقاء الإزاحة الزاوية ضمن تقريب الزاوية الصغيرة (أقل من نحو 10° عادةً).

المتغيِّر الذي تغيَّر	الطول L (m)	الزمن لعشر اهتزازات t (s)	الزمن الدوري T (t/10) (s)
البندول الاصلى			
أربعة أمثال الطول الاصلى			
ثقل أثقل			
إزاحة صغيرة أكبر (لا تزال الزاوية أقل من 10°)			

حلِّل ما جمعته:

(أ) عندما جُعل الطول أربعة أمثال، كيف تغير الزمن الدوري؟ قارن نتيجتك بالتوقع: $T \propto \sqrt{L}$

(ب) هل أثر تغيير كتلة الثقل بشكل ملحوظ في الزمن الدوري؟

(جـ) هل أثرت زيادة الإزاحة الابتدائية بشكل ملحوظ في الزمن الدوري عندما بقيت الزاوية صغيرة؟

اكتب تفسيرك في سطرين على الأكثر قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

ملاحظة القياس:

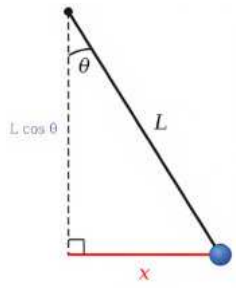
قِس الزمن لعشر اهتزازات كاملة، ثم احسب الزمن الدوري باستخدام T = t/10. ويقلل قياس وقت عدة اهتزازات عدم اليقين النسبي. ناتج عن زمن الاستجابة عند بدء تشغيل ساعة الإيقاف وإيقافها.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، عند زيادة طول الخيط الى 4 أمثال يزداد الزمن الدوري الى الضعف. بينما تركت الكتلة الأثقل والسعة الأكبر الزمن الدوري دون تغيير. ولعلك توقعت أن الكتلة الأثقل ستتأخر أو أن الدفعة الأوسع ستزيد الزمن الدوري — لكن الوقت المقاس يخالف ذلك. وفيما يلي النموذج الذي تشير إليه أدلتك.

تحليل الوزن إلى مركبات:

بالنسبة لثقل بندول كتلته m مربوط بخيط خفيف طوله L، يؤثر الوزن mg رأسيًا إلى أسفل، ويؤثر الشد في الخيط على طول الخيط، وتوفر مركبة الوزن على طول القوس قوة الاستعادة: $F = -mg\sin\theta$، حيث θ الإزاحة الزاوية عن الرأسي. وتُبيِّن الإشارة السالبة أن القوة تؤثر نحو وضع الاتزان.
والذي يعمل كقوة استعادة هي فقط مركبة القوة على طول القوس، $mg\sin\theta$ — ودائمًا تتجه عائدةً نحو O.



الشكل (3.3.2): الإزاحة الأفقية للثقل (الكرة) تساوي $\sin\theta = x/L$

البندول البسيط:

يتكون البندول البسيط من ثقل صغير معلَّق من نقطة ثابتة بخيط خفيف غير قابل للاستطالة. وللإزاحات الزاوية الصغيرة، يمكن تقريب حركته بحركة توافقية بسيطة.

تقريب الزاوية الصغيرة:

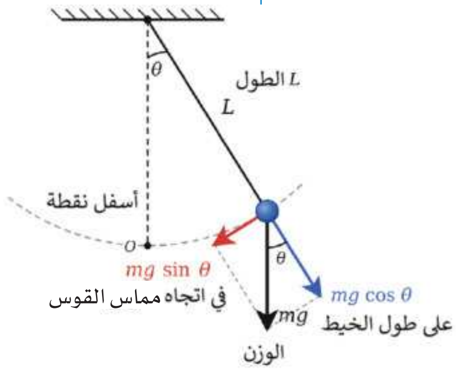
عندما يُزاح ثقل بندول بزاوية θ، تؤثر المركبة الماسية لوزنه بوصفها قوة الاستعادة:

$$F = -mg\sin\theta.$$

وللإزاحات الزاوية الصغيرة، بقياس θ بالراديان، $\sin\theta \approx \theta$. وتُعطَى إزاحة الثقل x على طول القوس الدائري بـ $x = L\theta$، لذا $\theta = x/L$.

لذا، $F \approx -mg\theta = -kx = mgx/L$.

لذا، وللاهتزازات الصغيرة، تتناسب قوة الاستعادة طرديًا مع الإزاحة عن وضع الاتزان وتؤثر في الاتجاه المعاكس. ويخضع البندول بالتالي لحركة توافقية بسيطة تقريبًا، بثابت قوة فعلي $k = \frac{mg}{L}$.



الشكل (4.3.2): المركبة من القوة الموازية للقوس هي التي تعمل على إعادة الثقل إلى موضع الاتزان.

من قوة الاستعادة إلى الزمن الدوري إلغاء الكتلة في حالة التذبذبات الصغيرة، تكون قوة الاستعادة هي $F = \frac{mgx}{L}$، وبمقارنة ذلك بالصيغة القياسية $F = -kx$ نحصل على $K = \frac{mg}{L}$: وبالتعويض في الصيغة العامة للزمن الدورى $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$. وبالتالي $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{(\frac{mg}{L})}} = \sqrt{\frac{L}{g}}$، فإن كتلة الثقل تُلغى، لذا فإن الزمن الدوري لا يعتمد على كتلة الثقل ويعتمد فقط على L و g، شريطة أن ينطبق تقريب الزاوية الصغيرة (فى حالة الزوايا الصغيرة فقط).

ملاحظة القياس:

شدة مجال الجاذبية بالقرب من سطح الأرض تساوي تقريبًا $g = 9.8\ \text{m s}^{-2}$. وبالنسبة للبندولات في الموقع نفسه، تكون g ثابتة، لذا يعتمد الزمن الدوري فقط على الطول L.

نقطة

! بلنسبة إلى ثقل كتلته m كيلو جرام ومعلق بخيط طوله L متر فإن القوة المؤثرة في الاتجاه المماسي لمسار الحركة هي مركبة وزن الثقل فى إتجاه الحركة، وتساوى :- $mg\sin\theta$
وبما أن اتجاه هذه القوة عكس اتجاه الإزاحة X على القوس من موضع الاتزان فإن :- $F= -mg\sin\theta$
عندما تكون زاوية التأرجح θ صغيرة بما يكفي، يمكن اعتبار:- $\sin\theta \approx \theta$2 -
وتكون الإزاحة على طول القوس :- $X=L\theta$
بالتعويض في العلاقة السابقة :- $F=-(mg/L)X$

! وهذا يعني أن قوة الاستعادة تتناسب طرديًا مع الإزاحة وتكون في الاتجاه المعاكس لها؛ لذلك يمكن اعتبار البندول البسيط ذي زاوية التأرجح الصغيرة حركة توافقية بسيطة SHM بصورة تقريبية

! الزمن الدوري للبندول البسيط هو $T = 2\pi\sqrt{(L/g)}$ ويعتمد الزمن الدوري على طول الخيط L وعلى عجلة الجاذبية g، لكنه لا يعتمد على كتلة الثقل ولا على السعة، بشرط أن تكون زاوية التأرجح صغيرة

ملحوظة: تختفي الكتلة m عند اختصارها من البسط والمقام أثناء اشتقاق العلاقة.

صندوق المعادلات:

دور البندول البسيط:	$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$

في $\sqrt{\frac{m}{(\frac{mg}{L})}}$، تظهر الكتلة m في كل من البسط والمقام فتُلغَى، فيبقى $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$. لذا، تعتمد الزمن الدوري على الطول L وشدة المجال g، لكن ليس على كتلة الثقل. ولم تدخل السعة أيضًا: فالزاوية الصغيرة بقيت القوة متناسبة مع x. ولاهتزازة صغيرة السعة فإن الزمن الدوري لا يعتمد على الكتلة والسعة — وهو **التماثل الزمني** في التوقيتات الذي أظهرته استكشافاتك.

اختبر ذلك: في خيطين متساويَين، علِّق صامولة ثقيلة على أحدهما وصامولة خفيفة على الآخر؛ أطلقهما معًا من الزاوية الصغيرة نفسها وبيِّن أنهما يبقيان متزامنين لعشر اهتزازات.

تحديد قوة الاستعادة للبندول البسيط:

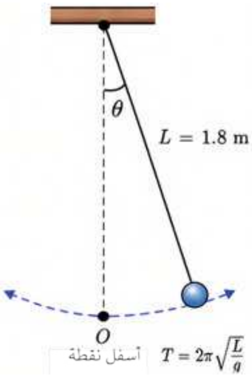
بالنسبة لنابض، تُكتَب قوة الاستعادة مباشرة بصورة $F = -kx$. أما بالنسبة لبندول بسيط، فتُستنتَج قوة الاستعادة الفعلية من المركبة المماسية لوزن الثقل. وللإزاحات الزاوية الصغيرة، $F = -mg\sin\theta$. لذا، $F = -\frac{mg}{L}x$، إذن $k = \frac{mg}{L}$. وبالتعويض في $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ نحصل على $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$.

مثال محلول:

الموقف:	لبندول بسيط خيط طوله $L = 1.8\,m$. خذ $\pi = 3.14$ وشدة مجال الجاذبية $g = 9.8\,m\,s^{-2}$. أوجد الزمن الدوري اهتزازه، لأقرب رقمين معنويين.
المعطيات والمطلوب:	$L = 1.8\,m$، $g = 9.8\,m\,s^{-2}$، $\pi = 3.14$ $\Leftarrow T =$ ؟ (الكتلة غير معطاة — وغير مطلوبة)
التمثيل:	في حالة الاهتزاز بزاوية صغيرة $\Rightarrow$ حركة توافقية بسيطة بثابت قوة فعّالة $k = mg/L$، ومن ثم فإن الزمن الدوري هو $(T = 2\pi\sqrt{(L/g)})$. العوامل المؤثرة هي L و g فقط
الاستراتيجية:	حدِّد قوة الاستعادة عند الإزاحة x: من الهندسة $F = -(mg/L)x$، لذا $k = mg/L$؛ ثم $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ وبالنسبة للبندول، عوِّض بـ L و g مباشرة.
الحل الموضح:	**1)** $k = mg/L$، لذا $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$. **2)** $L/g = 1.8/9.8 = 9/49$. **3)** $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} = 2\pi\sqrt{\frac{9}{49}} = 2\pi\times\frac{3}{7} = \frac{2\times3.14\times3}{7} \Rightarrow T = 2.7\,s$ $\Leftarrow T \approx 2.7\,s$.
منطقية الحل:	تحمل الإجابة وحدة الزمن (s)، كما يجب للزمن الدوري؛ $\sqrt{\frac{9}{49}} = \frac{3}{7}$ هو فحص تأكيد، ونحو 2.7 s الزمن الدوري معقولة لأرجوحة طولها نحو 1.8 m.
فسِّرها بنفسك:	لم تُعطَ كتلة الثقل أبدًا. لماذا لا تزال الزمن الدوري محدَّدةً بالكامل؟

كُتيِّب البيانات:

بالنسبة للبندول، استخدم $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}L/g$ مباشرة؛ تحتاج فقط إلى L و g — والكتلة غير مطلوبة ولا تظهر تأثيرها (مهملة).

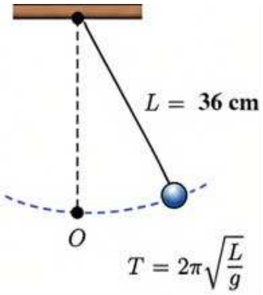


الشكل (5.3.2):
بندول طوله 1.8 m

حاول بنفسك: لبندول بسيط خيط طوله $(\pi = 3.14 ، g = 9.8\ m\ s^{-2})$ $L = 1.8\ m$.
أوجد طول الخيط الذي يجعل زمنه الدورى نصف قيمته الحالية. (دلل بالاسباب فى اجابتك).

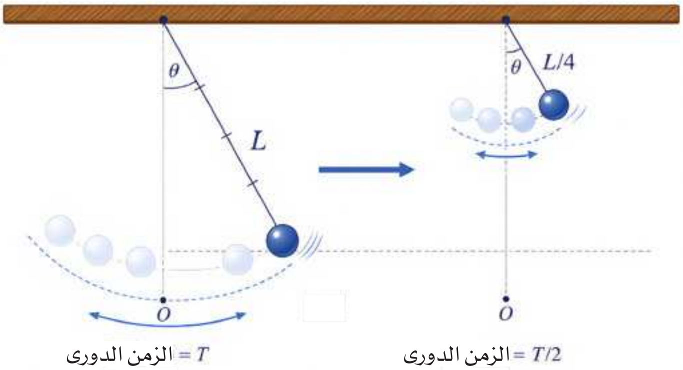
حاول:

(أ) أوجد الزمن الدوري، بالثانية، لبندول بسيط طول خيطه 36 سم.



الشكل (6.3.2): بندول طول الخيط 36

(ب) لبندول بسيط خيط طوله L والزمن الدوري T. أوجد طول الخيط الذي يجعل الزمن الدوري نصف قيمتها الحالية.



الشكل (6.3.2): نقص الطول الى الربع يقلل الزمن الدورى الى النصف.

سؤال للربط:
كيف يمكن استخدام الزمن الدورى لبندول بسيط لتحديد شدة المجال الجاذبية g؟

في سياق جديد — بندول فوكو في مكتبة الإسكندرية

يتدلى بندول فوكو طويل في مركز علوم القبة السماوية بمكتبة الإسكندرية. ونظرًا لطوله الكبير، يكون الزمن الدورى أطول من الزمن الدوري لأرجوحة حديقة عادية. وللاهتزازات الصغيرة، الزمن الدورى هو $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$. ويُستخدَم بندول فوكو أيضًا لإظهار دوران الأرض بالنسبة إلى مستوى الاهتزاز، تدور الأرض والمبنى من تحته. ويبدو لنا الأمر وكأن البندول يغير اتجاهه ببطء، إلا أن حركة الدوران هذه لا تؤثر على سرعة اهتزاز البندول.

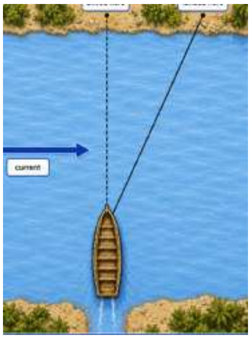
طول حبل بندول الإسكندرية نحو 15 m. باستخدام $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$، أوجد الزمن الدورى وقارنه بالزمن الدوري 2.7 s لأرجوحة الحديقة البالغ طولها 1.8 m.

طبيعة العلم: الأدلة والأنماط — الساعة التي كشفت تباين g على الأرض

في عام ١٦٧٢، لاحظ جان ريشيه أن ساعة بندول كانت تستخدم لقياس التوقيت في باريس أصبحت بطيئة في كايين، بالقرب من خط الاستواء. وبما أن $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$، فإن الزمن الدوري أطول تشير إلى قيمة أصغر لـ g. وقدَّم هذا دليلًا على أن g تتباين قليلًا بحسب الموقع على الأرض — إذ تكون أصغر بالقرب من خط الاستواء.

سؤال الدرس، وإجابته:

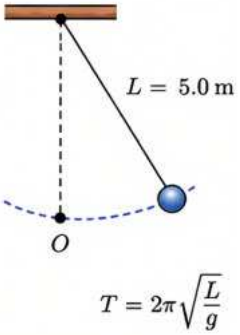
للاهتزازات الصغيرة، لا تؤثر كتلة الثقل ولا التغيّرات الطفيفة في السعة على الزمن الدوري البندول البسيط. توفر المركبة المماسية للوزن قوة الاستعادة $F = -mg\sin\theta$. وللزوايا الصغيرة $\sin\theta \approx x/L$، لذا $F = -(mg/L)x$. وهذه صورة الحركة التوافقية البسيطة بصلابة فعلية $k = mg/L$. وبالتعويض في $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ نحصل على $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$. لذا، تعتمد الزمن الدوري على L و g فقط، ولكن ليس على كتلة الثقل. كما تكون الزمن الدوري مستقلةً تقريبًا عن السعة للإزاحات الزاوية الصغيرة.



الشكل (7.3.2):
قارب مُثبَّت بحبل يتأرجح مثل البندول بفعل تيار الماء

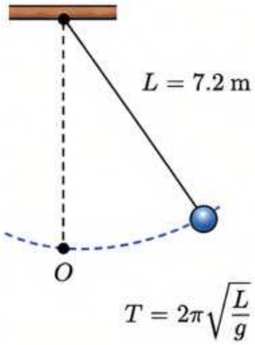
تمرين:

(أ) أوجد الزمن الدوري، بالثانية، لبندول بسيط طول خيطه 5.0 m.



الشكل (8.3.2):
بندول طوله 5 m

(ب) أوجد الزمن الدوري، بالثانية، لبندول بسيط طول خيطه 7.2 m.



الشكل (9.3.2):
بندول طوله 7.2 m

(جـ) أوجد العامل الذي يتغيَّر به الزمن الدوري لبندول بسيط، في كل حالة مما يلي (يمكن ترك الإجابات بصورة جذرية):

(i) تُجعَل السعة نصف مقدارها.

(ii) يُضاعَف طول الخيط.

(iii) تُصبح كتلة الثقل أربعة أمثالها.

سؤال بأسلوب الامتحان:

لبندول بسيط خيط طوله 2.0 m، خذ $\pi = 3.14$ و $g = 9.8\ \text{m s}^{-2}$.
أوجد الزمن الدوري للاهتزازة الصغيرة، واذكر ماذا يحدث لذلك الزمن الدوري إذا استُبدل الثقل بآخر ضعف كتلته.

الدرس ٢-٤ — الموجات الجيبية

؟ سؤال الدرس:

في موجة الملعب، ينتقل الاضطراب حول الملعب، بينما يبقى كل متفرج بالقرب من مقعده. ماذا تنقل الموجة؟

ستتعلم أن:

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

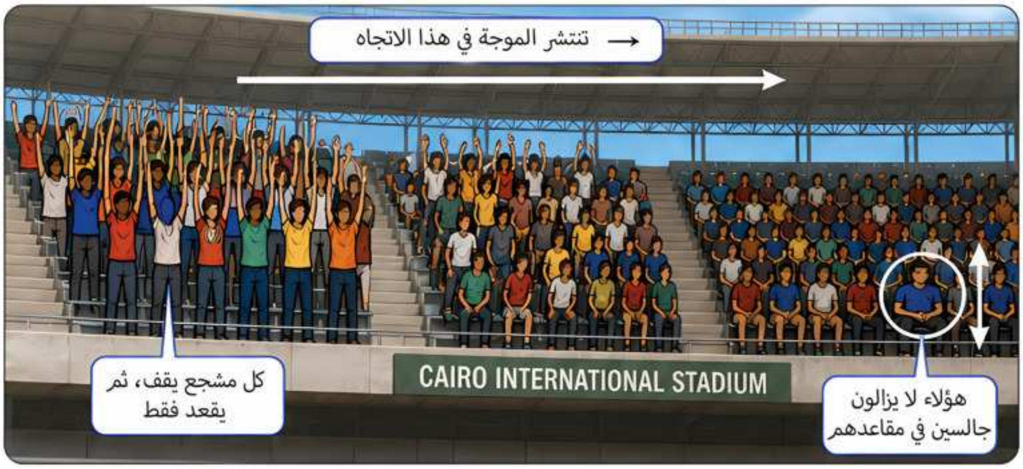
١. تصف الموجة بوصفها اضطرابًا منتقلًا ينقل طاقة دون انتقال فعلي للمادة.

٢. تحدد السعة والطول الموجي λ من مخطط الإزاحة-الموضع $(y-x)$، والزمن الدوري T من مخطط الإزاحة-الزمن $(y-t)$.

٣. تحسب سرعة الموجة باستخدام $v = f\lambda$.

٤. تقارن بين الموجات المستعرضة والطولية، وبين الموجات الميكانيكية والكهرومغناطيسية.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر


تنتشر الموجة في هذا الاتجاه ←
كل مشجع يقف، ثم يقعد فقط
CAIRO INTERNATIONAL STADIUM
هؤلاء لا يزالون جالسين في مقاعدهم

شكل (1.4.2): تعبر الموجة المدرجات بينما يظل كل مشجع في مقعده

في مباراة مزدحمة، يصنع الجمهور «موجة»: يقف قسم من المشجعين ويرفعون أذرعهم، ثم يجلسون، بينما يقف القسم التالي. وينتقل الاضطراب حول الملعب بأكمله في ثوانٍ قليلة — ومع ذلك يبقى كل مشجع في مقعده. ينتقل الاضطراب بوضوح حول الملعب بأكمله، لكن الناس لا يتحركون معه.

حقيقة أساسية:

في الموجات الميكانيكية، يهتز كل جسيم من الوسط حول موضع اتزانه. وينتقل الاضطراب عبر الوسط، لكن جسيمات الوسط لا تنتقل مع الموجة.

توقَّع قبل أن تستمر:

(أ) في موجة الملعب، هل ينتقل المتفرجون حول الملعب مع الموجة، أم يبقون بالقرب من مواضعهم؟

(ب) إذا تحرك المتفرجون عبر إزاحة رأسية أكبر، هل يزيد هذا بالضرورة سرعة الموجة؟ فسِّر إجابتك.

استكشف — ارسل نبضة على طول حبل مشدود وراقب حركة العلامة

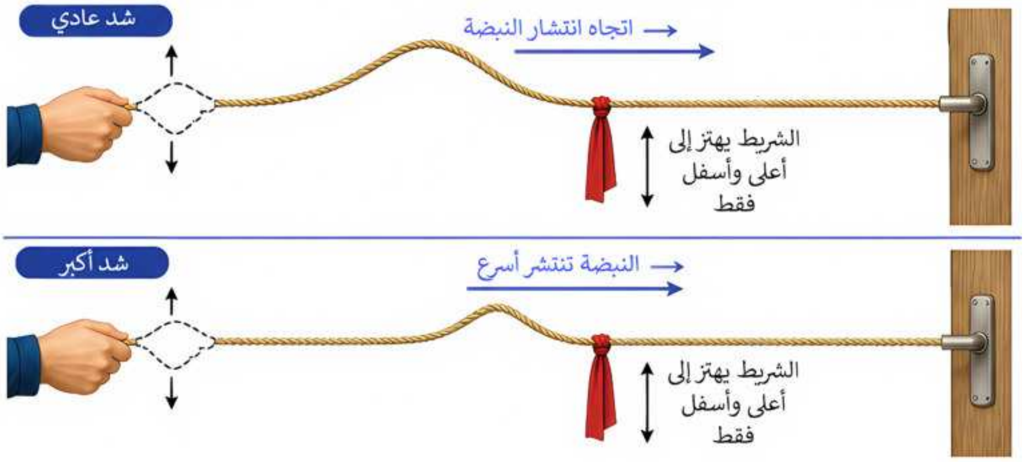
ما ستفعله: تُرسِل نبضة على طول حبل مشدود وتلاحظ حركة علامة ملوَّنة مثبَّتة على الحبل.

الزمن: 12 دقيقة

ما تحتاجه:

- حبل (حبل غسيل) طوله 3–4 m
- علامة قماشية ملوَّنة
- دعامة ثابتة أو شخص آخر يمسك أحد الطرفين

ملاحظة القياس: أرسل عدة نبضات وراقب الشريط نفسه في كل مرة: قد لا تكفي ملاحظة واحدة لاستنتاجات موثوقة.


شد عادي
اتجاه انتشار النبضة →
الشريط يهتز إلى أعلى وأسفل فقط
شد أكبر
النبضة تنتشر أسرع →
الشريط يهتز إلى أعلى وأسفل فقط

شكل (2.4.2): زيادة الشد تجعل النبضة تنتقل بسرعة أكبر على طول الحبل نفسه.

الخطوات:

١ افرد الحبل واربط العلامة الملوَّنة بالقرب من المنتصف.

٢ أمسك أحد طرفَي الحبل بينما يكون الطرف الآخر ثابتًا أو يمسكه شخص آخر.

٣ حرِّك يدك بحدة إلى أعلى وأسفل مرة واحدة لإرسال نبضة واحدة على طول الحبل.

٤ لاحظ ما إذا كانت العلامة تنتقل على طول الحبل أم تهتز حول موضع اتزانها، بينما تمر النبضة.

٥ زد الشد في الحبل وكرر النبضة. قارن سرعة النبضة في الحالتين.

التغيير الذي أُجري	حركة العلامة	السرعة النسبية للنبضة
شد عادي		
شد أكبر		

حلِّل ما جمعته:

(أ) عندما مرت النبضة بالعلامة، هل تحركت العلامة على طول الحبل أم اهتزت حول موضع اتزانها؟

(ب) كيف أثرت زيادة شد الحبل في سرعة النبضة؟ ماذا يقترح هذا عن اعتماد سرعة الموجة على خصائص الوسط؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

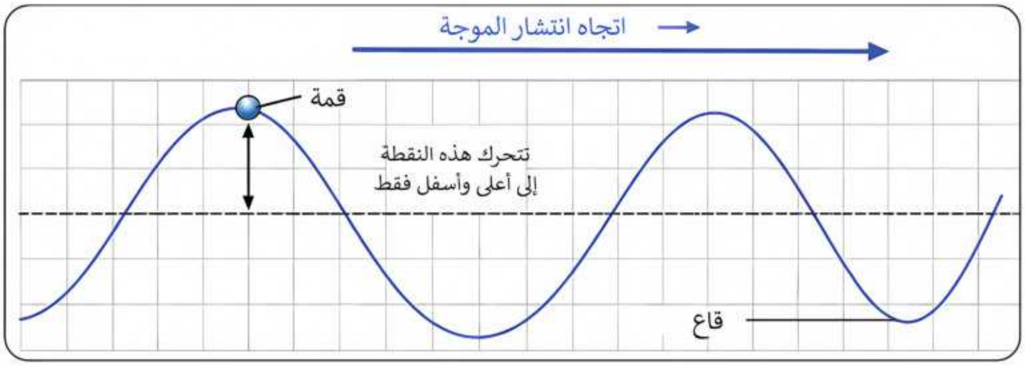
من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، رأيت النبضة تنتقل على طول الحبل بينما اهتز الشريط القماشي حول موضع اتزانه. ولعلك توقعت أن القماش سيتحرك معها — لكن هذا لم يحدث. كما غيَّر شد الحبل السرعة، رغم أن النبضة التي أعطيتها كانت نفسها. وفيما يلي النموذج الذي تشير إليه أدلتك.

اضطراب ينتقل عبر وسط:

الموجة اضطراب منتقل ينقل الطاقة من مكان إلى آخر دون انتقال فعلي للمادة. وفي الموجة الميكانيكية، ينتقل الاضطراب عبر وسط مادي مثل حبل أو ماء أو هواء. ويهتز كل جزء صغير من الوسط حول موضع اتزانه، بينما تمر الموجة.

الطول الموجي:
المسافة بين نقطتين متتاليتين متطابقتَين في الطور، مثلًا من قمة إلى القمة التالية أو من قاع إلى القاع التالي، على منحنى y-x.

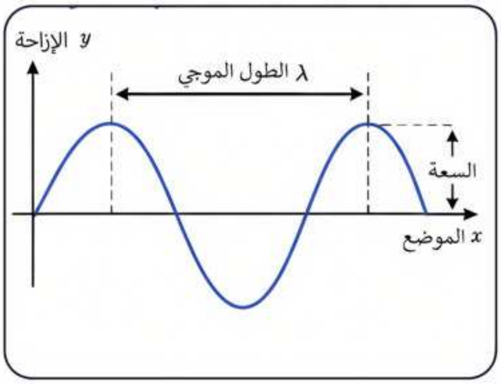


شكل (3.4.2) : تتحرك كل نقطة لأعلى ولأسفل بينما تنتقل الموجة على طول الحبل.

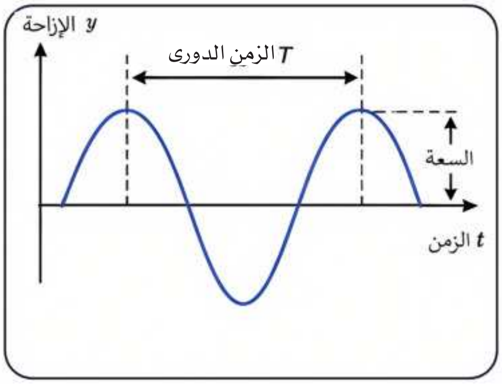
في الحبل، تنتقل النبضة على طول الحبل، بينما يتحرك كل جزء صغير من الحبل إلى أعلى وأسفل حول موضع اتزانه. لذا، ينتقل نمط الموجة والطاقة على طول الحبل، لكن مادة الحبل لا تنتقل مع الموجة. وإذا اهتز مصدر موجة بصورة جيبية، يمكن أن تُشكِّل إزاحة الوسط موجة جيبية متكررة. وتُسمى أعلى نقاط الموجة قممًا، وتُسمى أدنى نقاطها قيعانًا. والطول الموجي (λ) هو المسافة بين نقطتين متتاليتين متطابقتَين في الطور، كالمسافة من قمة إلى القمة التالية أو من قاع إلى القاع التالي. ويُقاس بوحدة المتر (m).

قراءة منحنيات الإزاحة-الموضع والإزاحة-الزمن:

يُظهر منحنى الإزاحة – الموضع (*y*–*x*) إزاحة (y) نقاط الوسط عند مواضع مختلفة (x) في لحظة واحدة. ومن هذا المنحنى، يمكن تحديد الطول الموجي (λ) والسعة (A). ولا يُظهر الزمن الدوري مباشرة.
ويُظهر منحنى الإزاحة–الزمن (*y*–*t*) إزاحة (y) نقطة ثابتة واحدة في الوسط مع تغيُّر الزمن (t). ومن هذا المنحنى، يمكن تحديد الزمن الدوري (T) والسعة (A). ولا يُظهر الطول الموجي مباشرة.



شكل (4.4.2) : رسم الإزاحة مقابل الزمن يحدد الزمن الدوري



شكل (5.4.2) : رسم الإزاحة مقابل الموضع يحدد الطول الموجي

علاقة سرعة الموجة:

يُنتج مصدر f موجة في الثانية. وخلال ثانية واحدة، ينتقل الاضطراب مسافة $f\lambda$، لذا فإن سرعة الموجة $v = f\lambda$، وبما أن التردد يساوي مقلوب الزمن الدوري، فإن السرعة تساوي أيضًا الطول الموجي مقسومًا على الزمن الدوري.

نقطة

الموجة: الظاهرة التي تنتشر فيها الاهتزازات الناتجة عند نقطة معينة خلال الوسط المحيط تُسمّى موجة.

مصدر الموجة: النقطة التي تبدأ عندها الاهتزازات تُسمّى مصدر الموجة (Wave source)

الطول الموجي λ: طول موجة كاملة واحدة يُسمّى الطول الموجي ويرمز له بـ λ ووحدته m

f التردد: عدد الاهتزازات التي تحدث في الثانية يُسمّى التردد f، ويرمز له بـ f ووحدته الهرتز Hz

العلاقة بين السرعة والطول الموجي والزمن الدوري إذا كان:

انتشار الموجة = v ، بوحدة الثانية، T = الزمن الدوري = s

$f = 1/T$ و $v = f\lambda = \lambda/T$

أي أن: سرعة الموجة = التردد × الطول الموجي

الموجة الجيبية: الموجه التى يتبع فيها الازاحة منحنى جيبي sine curve تسمى موجة جيبيه. (Sine wave)

الفرق بين y-X وy-t graphs

انتبه إلى المحور الأفقي:

(1) منحنى y-X: - يمثل شكل الموجة عند لحظة زمنية معينة، أي يمكن اعتباره مثل صورة فوتوغرافية للموجة كاملة.

(2) منحنى y-t: - يمثل حركة نقطة واحدة من الوسط مع مرور الزمن، أي يمكن اعتباره مثل فيديو لحركة هذه النقطة.

نصيحة امتحانية:

اذكر أي منحنى تقرأ منه كل كمية: λ والسعة من منحنى y-x (المكاني)، والزمن الدورى من مخطط y-t. والخلط بينهما هو الخطأ الأكثر شيوعًا.

صندوق المعادلات:

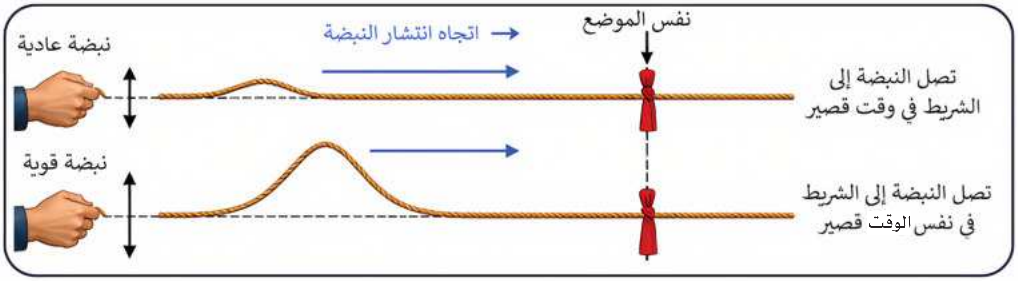
معادلات الموجة:	$v = f\lambda = \dfrac{\lambda}{T}$
التردد والزمن الدوري:	$f = \dfrac{1}{T}$

حقيقة أساسية:

بالنسبة لموجات على الحبل نفسه تحت قوة الشد نفسه، تزيد زيادة السعة الطاقة التي تحملها الموجة، لكنها لا تُغيِّر سرعة الموجة. وتعتمد السرعة على خصائص الوسط، كالشد والكتلة لكل وحدة طول لخيط مشدود.

اختبر ذلك:

أرسل نبضة عادية، ثم نبضة قوية، على الحبل نفسه وراقب الشريط القماشي: بيِّن أن كل نبضة تصله في الزمن القصير نفسه — وتختلف السعة فقط.

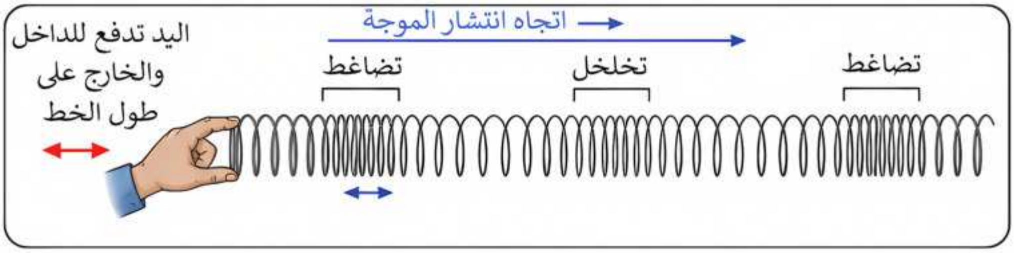

نبضة عادية
اتجاه انتشار النبضة
نفس الموضع
تصل النبضة إلى الشريط في وقت قصير
نبضة قوية
تصل النبضة إلى الشريط في نفس الوقت قصير

شكل (6.4.2): لا تؤثر سعة النبضة في سرعة انتشاره

أنواع الموجات: المستعرضة، والطولية، والميكانيكية، والكهرومغناطيسية

في الموجة المستعرضة الميكانيكية، تهتز جسيمات الوسط عموديًّا على اتجاه انتقال الموجة. والموجة على حبل مثال على ذلك.

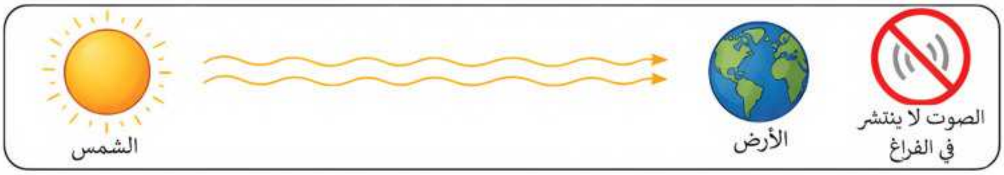
وفي الموجة الطولية، تهتز جسيمات الوسط بصورة موازية لاتجاه انتقال الموجة. والصوت في الهواء مثال على ذلك؛ ويتكون من مناطق تضاغط وتخلخل.



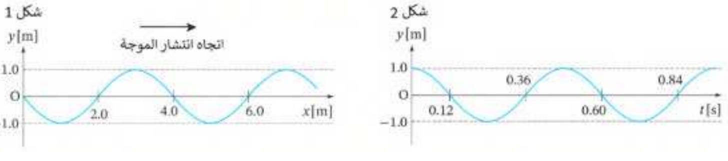
شكل (7.4.2) : لا تؤثر سعة النبضة في سرعة انتشاره.

الموجات الكهرومغناطيسية

الصوت موجة طولية ميكانيكية، لهذا يحتاج إلى وسط مادي ولا يمكنه الانتقال عبر الفراغ. أما الضوء فهو موجة كهرومغناطيسية، ويمكنه الانتقال عبر الفراغ بسرعة $c = 3\times10^8\ m/s$.


الشمس
الأرض
الصوت لا ينتشر في الفراغ

مثال محلول:

الموقف:	تنتقل موجة جيبية في اتجاه x الموجب. يُظهر منحنى الإزاحة–الموضع (y–x) شكل الموجة عند الزمن t = 0 s. ويُظهر منحنى الإزاحة–الزمن (y–t) حركة النقطة عند x = 3.0 m. أوجد السعة، والطول الموجي، والزمن الدوري.  شكل (9.4.2) : الموجة نفسها ممثَّلة بالنسبة إلى الموضع وبالنسبة إلى الزمن
المعطيات والمطلوب:	منحنى $y–x$: ارتفاع القمة ودورة كاملة على طول x. منحنى $y–t$: الزمن الدوري دورة كاملة على طول t. **المطلوب:** السعة، والطول الموجي، والزمن الدوري.
التمثيل	يُعطي المنحنيان كميات مختلفة: خذ الطول الموجي والسعة من منحنى $(y–x)$، والزمن الدوري من تتبع الزمن على $(y–t)$.
الاستراتيجية:	من $y–x$ اقرأ الطول الموجي والسعة؛ ومن أثر $y–t$ لنقطة واحدة اقرأ الزمن الدوري؛ وإذا طلبت السرعة، ادمجهما باستخدام $v = f\lambda$.

حقيقة أساسية:

بالنسبة للموجات التي تنتشر في الحبل نفسه وتحت مقدار الشد ذاته، فإن زيادة سعة الموجة تؤدي إلى زيادة الطاقة التي تحملها، ولكنها لا تغير سرعة الموجة؛ إذ تعتمد السرعة على خصائص الوسط، مثل قوة الشد والكتلة لكل وحدة طول في حالة الوتر المشدود.

سؤال الربط:

كيف تساعد الحركة التوافقية البسيطة في وصف الموجة الجيبية؟ في الموجة الجيبية، تتذبذب كل نقطة من نقاط الوسط حول موضع اتزانها، بينما ينتشر الاضطراب عبر الوسط.

الحل الموضح:	١) السعة من الارتفاع (يمكن قراءتها من أي من الرسمين البيانيين — حيث تصل القمة إلى نفس الارتفاع): تقع القمة عند $y = 1.0\ \text{m}$، لذا فإن السعة تساوي $1.0\ \text{m}$. ٢) الطول الموجي من الرسم البياني $y–x$ مسافة كاملة من القمة إلى القمة التالية على المحور x تمتد دورة واحدة من 0 إلى $4.0\ \text{m}$، لذا فإن الطول الموجي هو $4.0\ \text{m}$. ٣) الزمن الدوري من الرسم البياني $y–t$ دورة كاملة واحدة على طول t): تمتد دورة واحدة من $0.12\ \text{s}$ إلى $0.60\ \text{s}$، لذا فإن الزمن الدوري $0.60 - 0.12 = 0.48\ \text{s}$.
منطقية الحل:	تُقرأ السعة والطول الموجي من منحنى $(y–x)$، لذا وحدتاهما المتر. وتُقرأ الزمن الدوري من منحنى $(y–t)$، وبالتالي فإن وحدتها هي الثانية. وهذا يتسق مع تعريفات هذه الكميات.
فسِّرها بنفسك:	لماذا يمكن تحديد الزمن الدوري من منحنى $(y–t)$ لكن ليس من منحنى $(y–x)$؟

حاول بنفسك: تنتشر موجة جيبية في الاتجاه $+x$؛ ويُظهر منحنى $y–x$ الخاص بها دورة كاملة واحدة من $x = 0$ إلى $x = 2.0\ \text{m}$ بارتفاع قمة يبلغ $1.5\ \text{m}$، ويُظهر منحنى $y–t$ الخاص بها (بالنسبة للنقطة عند $x = 2.0\ \text{m}$) دورة كاملة واحدة خلال $0.4\ \text{s}$ أوجد السعة والطول الموجي والزمن الدوري.

نصيحة امتحانية:

اكتب خطوة التعويض — اكتب $v = f\lambda$ بالأرقام قبل النتيجة.

ولرسم شكل موجة متحركة، أزح الموجة بمقدار $d = v \times \Delta t$ في اتجاه الانتقال.

حاول:

(أ) لحركة توافقية بسيطة الزمن الدوري مقداره $2.0\ \text{s}$. أوجد ترددها بالهرتز.

(ب) لموجة جيبية طول موجي $2.0\ \text{m}$ وتردد $3.0\ \text{Hz}$. أوجد السرعة التي تنتقل بها بوحدة m s^{-1}.

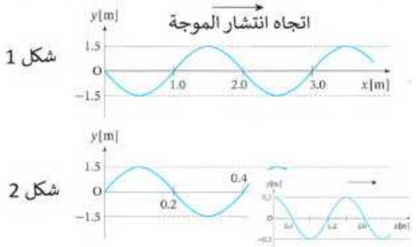
(جـ) بالنسبة للموجة الجيبية التي لها $(y–x$ عند $t = 0\ \text{s})$؛ $(y–t$ للنقطة عند $x = 2.0\ \text{m})$، **أوجد:**

(i) السعة بالمتر،

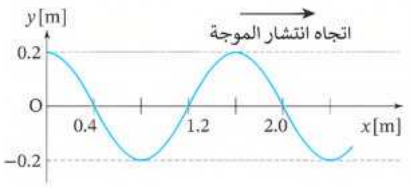
(ii) الطول الموجي بالمتر،

(iii) الزمن الدوري بالثانية.

(د) لموجة جيبية تتحرك في اتجاه $+x$ بسرعة $4.0\ \text{m s}^{-1}$ شكل الموجة الموضح في المخطط عند $t = 0\ \text{s}$. ارسمها عند $t = 0.50\ \text{s}$.



شكل (10.4.2) : رسمان بيانيان للموجة نفسها، خاصّان بالمثال المحلول.

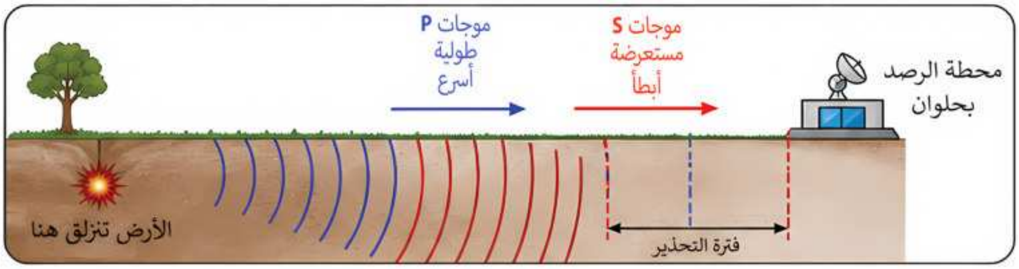


شكل (11.4.2) : موجة سعتها 0.2 m

في سياق جديد — موجتا الزلزال

عندما يحدث زلزال، يُنتج أنواعًا مختلفة من الموجات الزلزالية. الموجات الأولية، أو **موجات P**، وهي طولية وتنتقل بصورة أسرع عمومًا. والموجات الثانوية، أو **موجات S**، وهي مستعرضة وتنتقل بصورة أبطأ. وتغادر كلتا الموجتين المصدر في الوقت نفسه تقريبًا، لكن موجة P تصل إلى محطة الرصد أولًا.

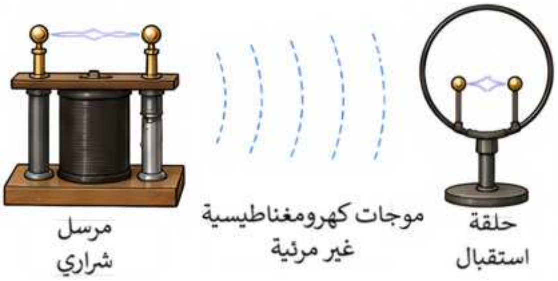
نصيحة امتحانية:
اكتب العلاقة f = 1/T و v = f λ، ثم وضّح خطوة التعويض؛ إذ تُمنح الدرجات على صحة خطوات الحل.


محطة الرصد بحلوان
موجات S مستعرضة أبطأ
موجات P طولية أسرع
فترة التحذير
الأرض تنزلق هنا

شكل (12.4.2): تصل الموجة الأولية (P) الأسرع أولًا، مما يترك فترة زمنية للتحذير قبل وصول الموجة الأبطأ

دورك الآن: تغادر موجتا P و S المصدر في الوقت نفسه تقريبًا، لكن موجة P تنتقل أسرع.
فسِّر: لماذا تزداد الفجوة الزمنية بين وصولهما لمحطة أبعد عن المصدر؟

طبيعة العلم — النماذج والأدلة — هرتز يكتشف الموجات التي تنبأ بها ماكسويل


حلقة استقبال
موجات كهرومغناطيسية غير مرئية
مرسل شراري

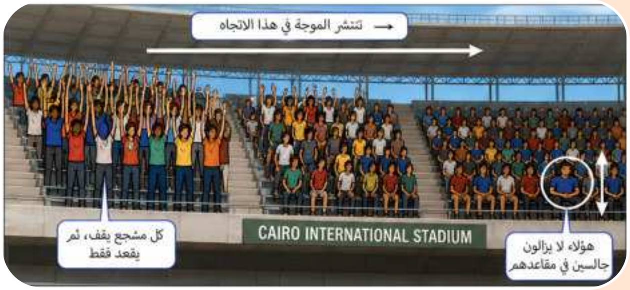
تنبأت نظرية ماكسويل الكهرومغناطيسية بأن الضوء موجة كهرومغناطيسية وأن الموجات الكهرومغناطيسية يمكن توليدها كهربائيًا. وفي عام ١٨٨٧، ولَّد هاينريش هرتز موجات كهرومغناطيسية واكتشفها في المعمل باستخدام مرسل شراري وحلقة استقبال. وقدَّم هذا دليلًا تجريبيًا على تنبؤ ماكسويل.

دورك الآن: لماذا كان دليل هرتز التجريبي ضروريًا لتأكيد تنبؤ ماكسويل؟

سؤال الدرس، وإجابته:

في موجة الملعب، ينتقل الاضطراب وطاقته حول الملعب، لكن المتفرجين لا ينتقلون مع الموجة. يتحرك كل متفرج إلى أعلى وأسفل حول موضعه، ثم يعود إلى وضع اتزانه.

وبالمثل، في الموجة الميكانيكية، تهتز جسيمات الوسط حول أوضاع اتزانها، بينما تنقل الموجة الطاقة عبر الوسط.


تنتشر الموجة في هذا الاتجاه
كل مشجع يقف، ثم يقعد فقط
CAIRO INTERNATIONAL STADIUM
هؤلاء لا يزالون جالسين في مقاعدهم

تمرين:

(أ) لحركة توافقية بسيطة الزمن الدوري مقداره $0.10\,s$. أوجد ترددها بالهرتز.

(ب) لحركة توافقية بسيطة الزمن الدوري مقداره $4.0\,s$. أوجد ترددها بالهرتز.

(جـ) لموجة جيبية الزمن الدوري مقدارها $0.20\,s$ وطول موجي $3.0\,m$. أوجد سرعتها بـ $m\,s^{-1}$.

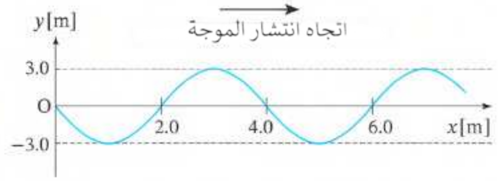
(د) لموجة جيبية طول موجي $1.5\,m$ وتردد $4.0\,Hz$. أوجد سرعتها بـ $m\,s^{-1}$.

(هـ) بالنسبة للموجة الجيبية في المنحنيين (y–x عند $t = 0\,s$؛ y–t للنقطة عند $x = 2.0\,m$)، أوجد:

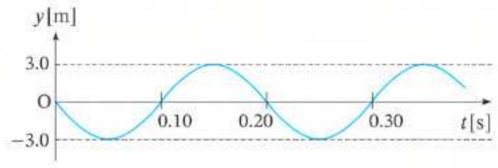
(i) السعة بالمتر.

(ii) الطول الموجي بالمتر.

(iii) الزمن الدوري بالثانية.

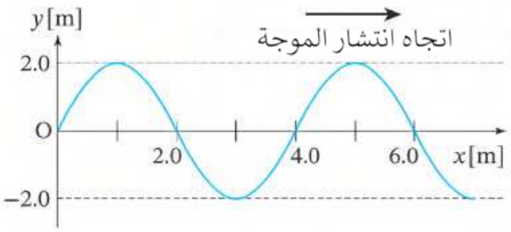


شكل 1



شكل 2

(و) لموجة جيبية تتحرك في اتجاه $+x$ بسرعة $1.0\,m\,s{-1}$ شكل الموجة الموضح عند $t = 0\,s$. ارسمها عند $t = 1.0\,s$.



سؤال بأسلوب الامتحان:

منحنى y–x لموجة جيبية على وتر يُظهر طولاً موجيًا $0.60\,m$ ومنحنى y–t يُظهر الزمن الدوري $0.20\,s$. أوجد التردد، ثم أوجد سرعة الموجة بـ $m\,s^{-1}$.

الدرس ٢-٥ — تداخل الموجات والموجات الموقوفة

؟ سؤال الدرس:

عندما يُصدر مكبِّرا صوت موجات صوتية مترابطة بالتردد نفسه، قد يكون الصوت عاليًا عند بعض المواضع وهادئًا عند أخرى. في ظل أي شروط تعزز الموجات بعضها بعضًا أو تُلغِي بعضها بعضًا؟

ستتعلم أن:

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. تطبق مبدأ التراكب؛ لتحديد الإزاحة المحصلة عندما تتراكب موجتان.

٢. تستخدم فرق المسار للتنبؤ بالتداخل البنَّاء والهدَّام لمصادر مترابطة.

٣. تصف كيف يمكن لموجتين لهما نفس التردد والسعة وتتحركان في اتجاهين متعاكسين أن تُكوِّنا موجة موقوفة.

⭐ حقيقة أساسية:

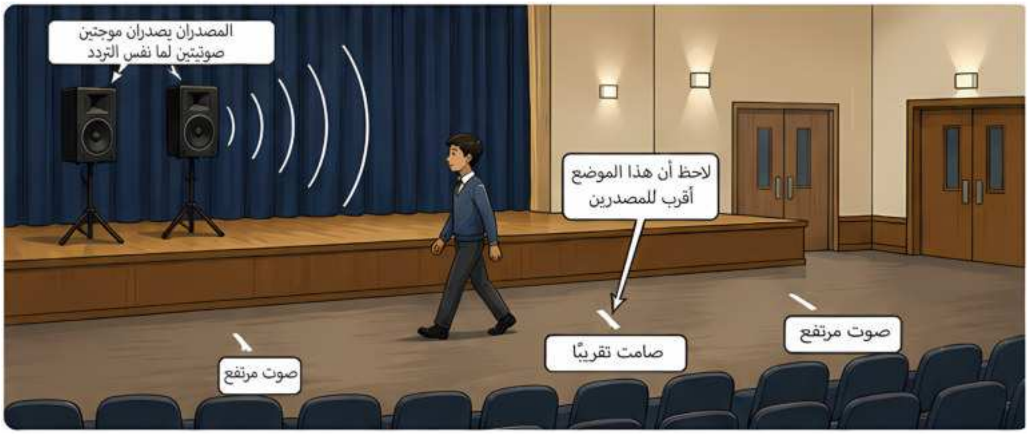
عندما تتراكب موجتان عند نقطة، تكون الإزاحة المحصلة المجموع الجبري للإزاحتين الناتجتين عن الموجتين المنفردتين:

$y = y_1 + y_2$

وهذا هو مبدأ التراكب.

بعد التراكب، تستمر الموجات في الانتشار كما كان الحال من قبل، بشرط أن يتصرف الوسط بشكل خطي.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر


المصدران يصدران موجتين صوتيتين لما نفس التردد
لاحظ أن هذا الموضع أقرب للمصدرين
صوت مرتفع
صامت تقريبًا
صوت مرتفع

شكل (1.5.2): يُنتج مكبّران صوتيّان مناطقَ مرتفعة ومنخفضة الشدة الصوتية عبر القاعة

قبيل حفل مدرسي، تُصدر نغمة اختبار ثابتة عبر مكبِّرَي صوت على المسرح. وبينما تسير على طول الواجهة، تكون النغمة عالية، ثم تكاد تختفي، ثم تعلو مرة أخرى — نمط متكرر. والمفاجئ أن هذا الموضع الهادئ أقرب إلى مكبِّرَي الصوت من الموضع العالي الذي يليه مباشرة. ويبقى مكبِّرا الصوت يعملان طوال الوقت.

توقَّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) هل تكون النقطة الأبعد عن مكبِّرَي الصوت أهدأ دائمًا؟ فسِّر لماذا قد لا يكون هذا صحيحًا عندما تتداخل موجتان.

(ب) إذا استُخدم مكبِّرا صوت متطابقان بدلاً من واحد، فهل يجب أن تكون كل نقطة في القاعة أعلى صوتًا؟ فسِّر إجابتك.

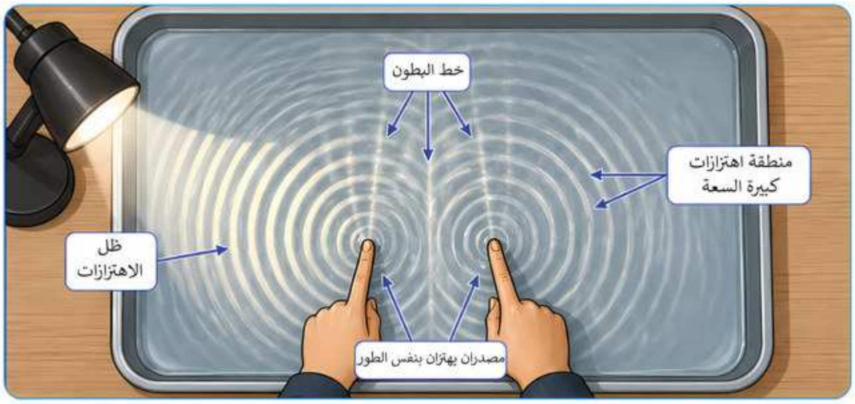
استكشف — لاحظ تداخل موجات الماء

ما ستفعله: تُنشئ مجموعتين من تموجات الماء وتلاحظ نمط تداخلهما.

الزمن: 12 دقيقة.

ما تحتاجه:

- صينية واسعة ضحلة.
- ماء بعمق نحو 1 سم.
- إصبعان أو طرفا قلمَي رصاص مثبَّتان على بُعد بضعة سنتيمترات.
- مصباح ساطع أو مصباح هاتف يدوي.



الخطوات:

١ املأ الصينية بالماء واترك السطح ليصبح ساكنًا.

٢ اغمس طرفَي القلمين أو الإصبعين في الماء، وانقر سطح الماء بهما معًا بمعدل ثابت.

٣ لاحظ نمط التموجات والظلال على قاع الصينية.

٤ حدِّد الخطوط التي يبقى فيها الماء ساكنًا تقريبًا والمناطق المجاورة التي يهتز فيها الماء بقوة.

٥ زد تردد النقر ولاحظ كيف يتغيَّر التباعد بين الخطوط الساكنة المتجاورة.

معدل النقر	عدد الخطوط الساكنة المُلاحَظة	التباعد بين الخطوط الساكنة المتجاورة
بطيء وثابت		
أسرع وثابت		

حلِّل ما جمعته:

(أ) هل الخطوط الساكنة متباعدة بانتظام تقريبًا؟ ماذا يحدث لتباعدها عند زيادة تردد النقر؟

(ب) ينقر كلا المصدرين بالطور نفسه. لماذا تبقى بعض النقاط بين المصدرين ساكنة تقريبًا؟

اكتب تفسيرك في سطرين على الأكثر قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

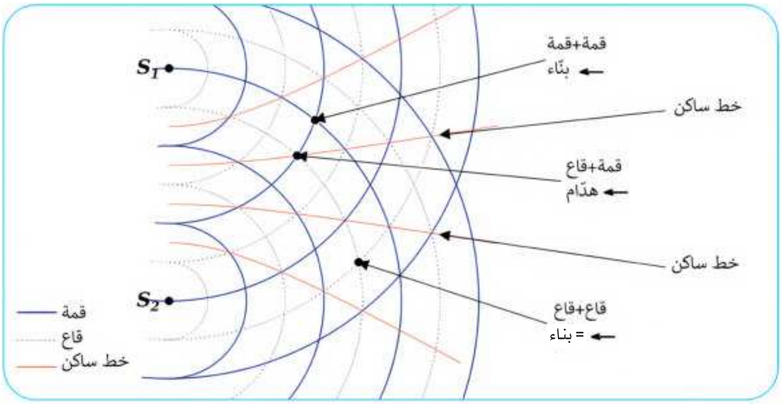
الملاحظ من خلال النموذج:

في نشاط الاستكشاف (Explore)، تكوّنت خطوط كانت المياه عندها شبه ساكنة، وتُسمّى الخطوط العقدية (Nodal lines)، ضمن نمط التداخل الناتج عن مصدرين متوافقين في الطور. وقد لوحظ أن المسافة بين هذه الخطوط تقل كلما زاد التردد.

قد تتوقع أن وجود مصدرين للموجات سيؤدي إلى سعة أكبر في كل مكان، وهذا ما قد يتوقعه معظم الناس. لكن المصدرين استمرا في الاهتزاز بالمعدل نفسه، ولذلك فإن النمط المشاهد ينتج من تراكب الموجتين عند المناطق التي تتداخلان فيها.

موجتان عند نقطة واحدة – تجمع الإزاحتان:

عندما تلتقي موجتان عند نقطة في وسط خطي، فإن الإزاحة المحصلة تساوي المجموع الجبري للإزاحتين الناتجتين عن الموجتين: $y = y_1 + y_2$. وإذا وصلت قمتان معًا، تكون الإزاحة المحصلة أكبر؛ وهذا تداخل بنّاء. وإذا وصل قاع وقمة مساوية له معًا، تكون الإزاحة المحصلة صفرًا؛ وهذا تداخل هدّام.



فرق المسار يحدد – معبّرًا عنه بأنصاف أطوال موجية:

بالنسبة لمصدرين مترابطين S_1 و S_2، فرق المسار عند نقطة P هو: $\Delta d = |S_1P - S_2P|$ حيث S_1P و S_2P هما المسافتان من المصدرين إلى النقطة P.

بالنسبة لمصدرين مترابطين يهتزان بالطور نفسه، يحدث التداخل البنّاء عندما $\Delta d = n\lambda$، حيث n = 0، 1، 2، 3،.... ويحدث التداخل الهدّام عندما $\Delta d = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$، حيث n = 0، 1، 2، 3،..... وإذا اهتزّ المصدران المترابطان بطورين متعاكسين، تنعكس الشروط: فروق المسار التي أنتجت تداخلاً بنّاءً للمصدرين متطابقَي الطور تُنتج تداخلاً هدّامًا، والعكس صحيح.

نقطة

! الكمية التي تمثل حالة اهتزاز الوسط، أي إزاحته وسرعته، تُسمّى الطور (Phase). ويقال إن نقطتين تكونان متفقتين في الطور (In phase) إذا كانت إزاحتاهما متساويتين ومتطابقتين في الاتجاه عند كل لحظة؛ بينما تكونان متعاكستين في الطور (In antiphase) إذا كانت إزاحتاهما متساويتين في المقدار ومتعاكستين في الاتجاه.

! تُعرف الظاهرة التي تتراكب فيها الموجات الصادرة عن مصادر مترابطة وتُحدث تأثيرات متفاوتة من مكان لآخر باسم "تداخل الموجات". فعندما تلتقي قمة بموجة مع قمة أخرى، أو قاع بموجة مع قاع آخر، تقوى الموجات؛ ويُسمى هذا "التداخل البنّاء"، ويكون فيه فرق المسار مساوياً لـ nλ. أما عندما تلتقي قمة بموجة مع قاع موجة أخرى، فإن الموجات تتلاشى (أو تلغي بعضها البعض)؛ ويُسمى هذا "التداخل الهدّام"، ويكون فيه فرق المسار مساوياً لـ (n + ½)λ.

! عندما يكون المصدران متوافقين في الطور ولهما التردد والسعة نفسيهما، فإن الموجات تنتشر في اتجاهين متعاكسين وتتداخل، وينشأ نمط موجة واقفة (Standing wave). النقاط التي لا تتحرك مطلقًا تُسمّى العُقَد (Nodes)، بينما النقاط التي تهتز بأكبر سعة تُسمّى البُطون.

صندوق المعادلات:

التداخل البنّاء (للمصادر المترابطة ومتطابقة الطور):	فرق المسار = $n\lambda$
التداخل الهدّام:	فرق المسار = $\left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$

حقيقة أساسية:

فرق المسار عند نقطة (P) هو الفرق بين المسافتين من المصدرين إلى تلك النقطة:

$$\Delta d = |S_1P - S_2P|$$

ويحدد ما إذا كانت الموجتان تصلان بالطور نفسه أم بطورين متعاكسين.

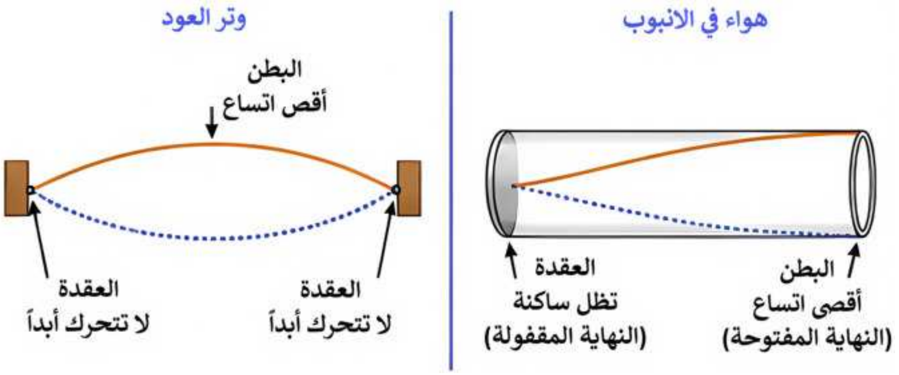
كُتيّب البيانات:

$n\lambda$ و $\left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$ في فصل الموجات، حيث n عدد صحيح (...، 2، 1، 0). استخدم فرق المسار وعدد أنصاف الأطوال الموجية التي يحتويها لتحديد نوع التداخل

الموجات الموقوفة الناتجة عن موجات تتحرك في اتجاهين متعاكسين

تتكوَّن الموجة الموقوفة عندما تتحرك موجتان مترابطتان لهما نفس التردد والسعة في اتجاهين متعاكسين وتتداخلان. ولا ينتقل النمط الناتج على طول الوسط. بل تبقى نقاط ثابتة تُسمى عقدًا عند إزاحة صفرية، بينما تهتز نقاط تُسمى بطونًا بأقصى سعة.

- العقدة نقطة على الموجة الموقوفة تبقى ساكنة.
- البطن نقطة على الموجة الموقوفة تكون فيها السعة أقصى ما يمكن.

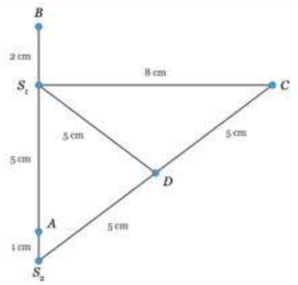

هواء في الأنبوب
العقدة
تظل ساكنة
(النهاية المقفولة)
البطن
أقصى اتساع
(النهاية المفتوحة)
وتر العود
البطن
أقص اتساع
العقدة
لا تتحرك أبدًا
العقدة
لا تتحرك أبدًا

شكل (4.5.2): العُقَد والبُطون على وتر وفي أنبوب

الرنين والموجات الموقوفة: يحدث الرنين عندما يُحرِّك نظام عند تردد من تردداته الطبيعية أو بالقرب منه، مما يُسبِّب اهتزازًا كبيرًا في السعة. وفي وتر مثبَّت من طرفيه، لا تُنتج أنماط موجات موقوفة ثابتة سوى ترددات معيّنة.

مثال محلول:

تداخل مصدرين على سطح ماء


B
2 cm
S_1
8 cm
C
5 cm
5 cm
5 cm
D
A
5 cm
1 cm
S_2

شكل (5.5.2): فروق المسار من المصدرين إلى أربع نقاط.

الموقف:	ينتج مصدران لموجات ماء متطابقان في الطور، S_1 و S_2، نمط تداخل. النقاط A وB وC وD موضحة مع مسافاتها بالسنتيمتر من المصدرين، وعند أي نقطة P، يُحدَّد نوع التداخل بفرق المسار: $\Delta d = \lvert S_1P - S_2P \rvert$.
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** سعة كل موجة = 0.30 cm، الطول الموجي $\lambda = 4.0$ cm، إذن $\lambda/2 = 2.0$ cm. **المطلوب:** تحديد نقاط التداخل البنَّاء بين A وB وC وD؛ عدد نقاط التداخل البنَّاء بين S_1 و S_2؛ السعتان عند C وD؛ والسعة عند D عندما يُصدر المصدران موجتين بطورين متعاكسين.
التمثيل:	استخدم فرق المسار $\Delta d = \lvert S_1P - S_2P \rvert$. بالنسبة للمصادر المتوافقة في الطور، تؤدي المضاعفات الزوجية لـ $\lambda/2$ إلى تداخل بناء، بينما تؤدي المضاعفات الفردية لـ $\lambda/2$ إلى تداخل هدام.
الاستراتيجية:	بما أن $\lambda/2 = 2.0$ cm، قارن كل فرق مسار بمضاعفات 2.0 cm: 0، 4، 8، … cm بنَّاءة؛ و2، 6، 10، … cm هدَّامة.

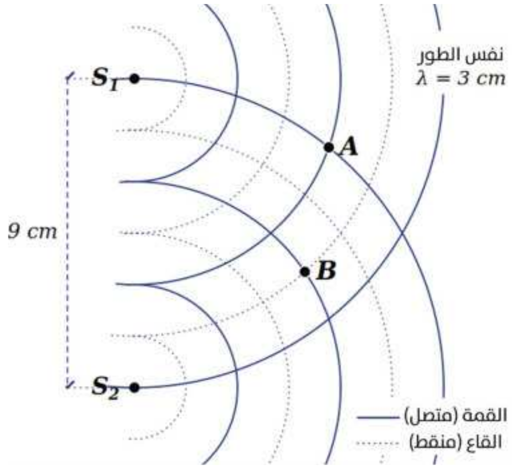
تطبيق سريع:

يرسل مصدران مترابطان متطابقا الطور موجات طولها الموجي 4.0 cm؛ ويختلف المساران من المصدرين إلى نقطة بمقدار 6.0 cm. اذكر عدد أنصاف الأطوال الموجية، وما إذا كانت النقطة تخضع لتداخل بنّاء أم هدّام.

الحل الموضح:	(أ) $A: \Delta d = 4\ \text{cm} = 2\left(\frac{\lambda}{2}\right) \Leftarrow$ بنَّاء. $B: \Delta d = 6\ \text{cm} = 3\left(\frac{\lambda}{2}\right) \Leftarrow$ هدَّام. $C: \Delta d = 2\ \text{cm} = 1\left(\frac{\lambda}{2}\right) \Leftarrow$ هدَّام. $D: \Delta d = 0 = 0\left(\frac{\lambda}{2}\right) \Leftarrow$ بنَّاء. إذن، نقطتا التداخل البنَّاء هما A وD. (ب) يحدث التداخل البنَّاء عندما $\Delta d = 0$ أو 4 cm، مما يُعطي ثلاث نقاط: $(S_1P, S_2P) = (3\ \text{cm}, 3\ \text{cm}), (1\ \text{cm}, 5\ \text{cm}), (5\ \text{cm}, 1\ \text{cm})$. (جـ) عند C، هدَّام: السعة = 0 cm. وعند D، بنَّاء: السعة = $0.30 \times 2 = 0.60$ cm (د) لو أصدر المصدران بطورين متعاكسين، يصبح D هدَّامًا: السعة = 0 cm.
منطقة الحل:	تتبع النتائج قاعدة المصادر المتطابقة الطور: المسارات المتساوية أو فروق أنصاف الأطوال الموجية الزوجية تُعطي تداخلًا بنَّاءً؛ والفردية تُعطي تداخلًا هدَّامًا
فسِّرها بنفسك:	أوجد فرق المسار من S_1 و S_2، ثم قارنه بـ $\frac{\lambda}{2}$. إذا كان عدد أنصاف الأطوال الموجية زوجيًّا، يكون التداخل بنَّاءً؛ وإذا كان فرديًّا، يكون هدَّامًا.

حاول بنفسك: المصدران نفساهما، بطول موجي 6.0 cm وسعة 0.50 cm. عند النقطة P تكون المسافتان $S_1P = 28$ cm و $S_2P = 37$ cm. **أوجد** فرق المسار، وعدد أنصاف أطوال الموجية، والسعة عند P — أولًا بافتراض تطابق طورَي المصدرين، ثم بافتراض تعاكسهما.

حاول:



شكل (6.5.2):
مصدران يبعد أحدهما عن الآخر 9 cm ويصدران موجات طولها الموجي 3 cm.

(أ) كما في الشكل، يهتز مصدران S_1 و S_2، على بُعد 9 cm من بعضهما، بالطور نفسه ويُصدران موجات طولها الموجي 3 cm.

(i) حدِّد ما إذا كانت النقطتان A و B نقطتَي تداخل بنَّاء أم هدَّام.

(ii) حدِّد عدد الخطوط الساكنة (خطوط التداخل الهدَّام) الواقعة بين S_1 و S_2.

نصيحة امتحانية:
اعرض سطرًا فرق المسار في كل إجابة: اكتب $|S_1P - S_2P|$ وعدده من أنصاف الأطوال الموجية قبل ذكر النتيجة.

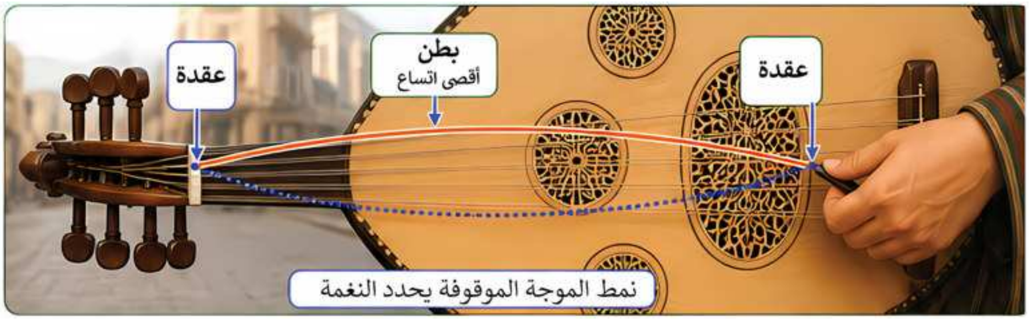
(ب) تُصدِر موجتان طولهما الموجي 5.0 cm وسعتهما 1.0 cm من نقطتين S_1 و S_2. وعند النقطة P تكون المسافتان $S_1P = 30\text{ cm}$ و $S_2P = 37.5\text{ cm}$.

(i) أوجد السعة عند P عندما يهتز S_1 و S_2 بالطور نفسه.

(ii) أوجد السعة عند P عندما يهتزان بطورين متعاكسين.

سياق جديد — وتر العود المهتز

عندما يُنقَر وتر عود، تنتقل موجات على طول الوتر وتنعكس عند الطرفين الثابتين. ويمكن أن يُشكِّل تراكب الموجتين الساقطة والمنعكسة موجة موقوفة. وبما أن طرفَي الوتر ثابتان، يجب أن يكونا عقدتين. وفي النمط الأساسي، تكون نقطة منتصف الوتر بطنًا. وبزيادة الشد في الوتر تزيد سرعة الموجة عليه. ولنفسه الطول المهتز، فإن ذلك يزيد الترددات الطبيعية، فترتفع درجة النغمة.



نمط الموجة الموقوفة يحدد النغمة

سؤال للربط:
كيف ترتبط شروط الحدود لنظام بالموجات الموقوفة التي يمكنه دعمها؟

⇦ طرفا الوتر المنقور ثابتان ولا يمكنهما التحرك. فسِّر: لماذا يجب أن يكون هذان الطرفان الثابتان عقدتين للموجة الموقوفة؟

طبيعة العلم: الأنماط والاتجاهات — مبدأ واحد يحكم الماء والصوت والضوء

تنطبق قواعد التداخل نفسها على موجات الماء والصوت والضوء. وأظهرت تجربة الشق المزدوج لتوماس يونغ أهدابًا مضيئة ومظلمة ناتجة عن التداخل البنَّاء والهدَّام للضوء. وقدَّم هذا دليلًا قويًّا على أن للضوء خصائص موجية.

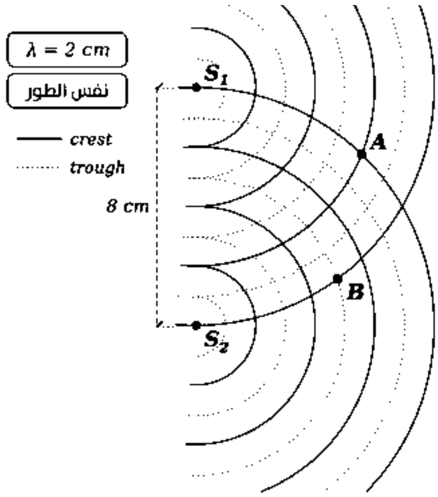
⇦ اقترح لماذا يظهر نمط التداخل نفسه (بنَّاء وهدَّام) في الماء والصوت والضوء.

سؤال للربط:
في الفقرة (ب)، $\frac{\lambda}{2} = 2.0\text{ cm}$. عبِّر عن كل فرق مسار كمضاعف لـ $\frac{\lambda}{2}$، ثم حدِّد ما إذا كان التداخل بنَّاءً أم هدَّامًا.

سؤال الدرس، وإجابته:

عندما تلتقي موجتان مترابطتان من مصدرين يهتزان بالطور نفسه، تتجمع إزاحتاهما جبريًّا. وعند النقاط التي يكون فيها فرق المسار عددًا صحيحًا من الأطوال الموجية، $\Delta d = n\lambda$، تصل الموجتان بالطور نفسه وتعزز إحداهما الأخرى. وعند النقاط التي يكون فيها فرق المسار عددًا فرديًّا من أنصاف الأطوال الموجية، $\Delta d = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$، تصل الموجتان بطورين متعاكسين وتُلغي إحداهما الأخرى. ويفسر هذا لماذا يمكن أن يكون صوت مكبِّرَي صوت عاليًا عند بعض المواضع وهادئًا عند الأخرى.

تمرين:



(أ) كما في الشكل، يهتز مصدران S_1 و S_2، على بُعد 8 cm بينهما، بالطور نفسه ويُصدران موجات طولها الموجي 2 cm.

(i) حدِّد ما إذا كانت النقطتان A و B نقطتَي تداخل بنَّاء أم هدَّام.

(ii) حدِّد عدد الخطوط الساكنة الواقعة بين S_1 و S_2.

(ب) تُصدر نقطتان S_1 و S_2 على سطح ماء موجات بالطور نفسه، بسعة 0.30 cm وطول موجي 4.0 cm. وعند النقاط A و B و C، فروق المسار: $|\Delta C| = 6$ cm، $|\Delta B| = 0$ cm، $|\Delta A| = 4$ cm. أوجد السعة عند A و B و C، بالسنتيمتر.

(جـ) تَصدُر موجتان طولهما الموجي 6.0 cm وسعتهما 0.40 cm من S_1 و S_2. وعند النقطة P تكون المسافتان $S_1P = 20$ cm و $S_2P = 35$ cm. أوجد السعة عند P عندما يهتز المصدران بالطور نفسه، ثم بطورين متعاكسين.

سؤال بأسلوب الامتحان:

يُصدر مصدران مترابطان موجات ماء متطابقة بالطور نفسه. وعند النقطة M يبقى السطح ساكنًا تقريبًا.
بيِّن بإيجاز: لماذا تبقى M ساكنة تقريبًا؟

الدرس ٢-٦ — انكسار الموجات

؟ سؤال الدرس:

عندما تدخل موجة وسطًا تختلف فيه سرعتها، لماذا يتغيَّر اتجاهها عند الحد الفاصل؟

ستتعلم أن:

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. تحدد سرعة موجة أو طولها الموجي أو الزاوية عند حد فاصل باستخدام قانون سنِل $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$.

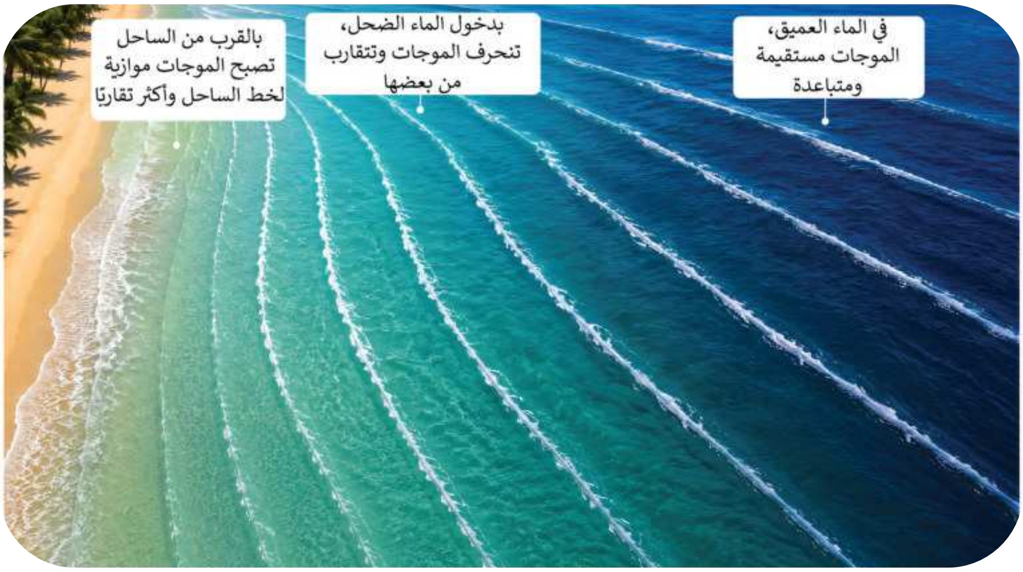
٢. تفسر أن الانكسار يحدث؛ لأن سرعة الموجة تتغيَّر عند الحد الفاصل، بينما يبقى التردد ثابتًا.

٣. تستخدم $v = f\lambda$ لتفسير لماذا يتغيَّر الطول الموجي عندما تتغيَّر سرعة الموجة.

حقيقة أساسية:

لموجة، $v = f\lambda$، حيث v سرعة الموجة، وf التردد، وλ الطول الموجي. وصدر الموجة خط يصل نقاطًا متطابقة الطور. والشعاع خط يُرسَم عموديًا على السطح الموجي.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر


في الماء العميق، الموجات مستقيمة ومتباعدة
بدخول الماء الضحل، تنحرف الموجات وتتقارب من بعضها
بالقرب من الساحل تصبح الموجات موازية لخط الساحل وأكثر تقاربًا

شكل (1.6.2): تنحني الموجات وتقل المسافة بينها عند انتقالها إلى مياه أقل عمقًا.

قف على شاطئ الساحل الشمالي وراقب البحر. بعيدًا في الأفق، تقترب قمم الأمواج بزاوية مائلة، منحرفة عبر الماء، ولكن بحلول وصولها إلى الرمال، تكون قمم الأمواج نفسها قد انكسرت وتصل شبه موازية للشاطئ — في كل مرة، مهما كانت الزاوية التي بدأت بها في الماء العميق بعيدًا عن الساحل.

توقَّع قبل أن تستمر:

(أ) لماذا تصل أمواج البحر عادةً إلى الشاطئ بقمم شبه موازية للخط الساحلي؟ هل يبقى اتجاهها دون تغيير، أم يتغيَّر عندما يصبح الماء أقل عمقًا؟

(ب) تنتقل أمواج الماء بصورة أبطأ في الماء الضحل. كيف يؤثر هذا التغيُّر في السرعة في اتجاه صدر الموجة وهي تقترب من الشاطئ؟

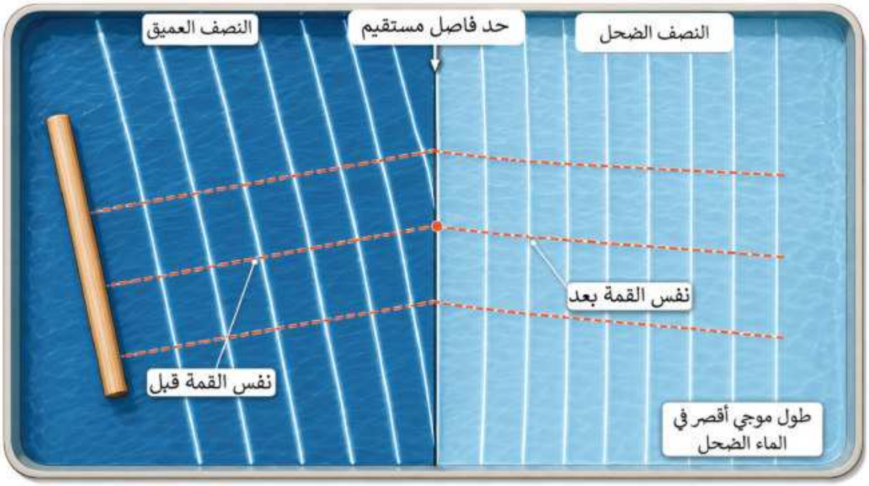
استكشف — لاحظ انكسار موجات ماء مستوية

ما ستفعله: تلاحظ كيف تُغيِّر موجات ماء مستقيمة اتجاهها وهي تمر بين مناطق ذات أعماق مختلفة.

الزمن: 12 دقيقة.

ما تحتاجه:

- صينية واسعة ضحلة.
- ماء بعمق نحو 1 سم.
- طبق أو بلاطة مسطحة لإنشاء منطقة أقل عمقًا.
- مسطرة لتوليد أسطح موجية مستقيمة.
- مصباح هاتف يدوي أو مصباح.



شكل (2.6.2): يقصر الطول الموجي في الجزء الضحل من الحوض.

الخطوات:

١ ضع الطبق في الصينية بحيث تكون إحدى المنطقتين أعمق والأخرى أقل عمقًا، مع حد فاصل مستقيم بينهما.

٢ أضِئ الماء من الجانب بحيث يظهر مقدمة الأمواج بوضوح.

٣ استخدم المسطرة لتوليد أمواج ذات صدر (مقدمة) مستقيمة في المنطقة الأعمق، موجَّهة نحو الحد الفاصل بزاوية.

٤ ارسم مقدمة الموجة قُبيل وصولها إلى الحد الفاصل وآخر بعد دخولها المنطقة الأقل عمقًا مباشرة.

٥ كرر باستخدام زاوية سقوط أصغر، وقارن التغيّر في الاتجاه.

مقدمة الموجة الساقطة	زاوية السقوط	زاوية الأنكسار.	اتجاه الانكسار
زاوية أكثر انحدارًا			
زاوية أصغر			

حلِّل ما جمعته:

(أ) عندما دخلت الأمواج المنطقة الأقل عمقًا، هل أصبح صدر (مقدمة) الأمواج أقرب إلى التوازي مع الحد الفاصل؟

(ب) وبينما دخلت الموجة المنطقة الأقل عمقًا، أي الكميات تغيَّرت: السرعة، أم الطول الموجي، أم التردد؟ وأي كمية بقيت ثابتة؟

اكتب تفسيرك في سطرين على الأكثر قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

ملاحظة القياس:

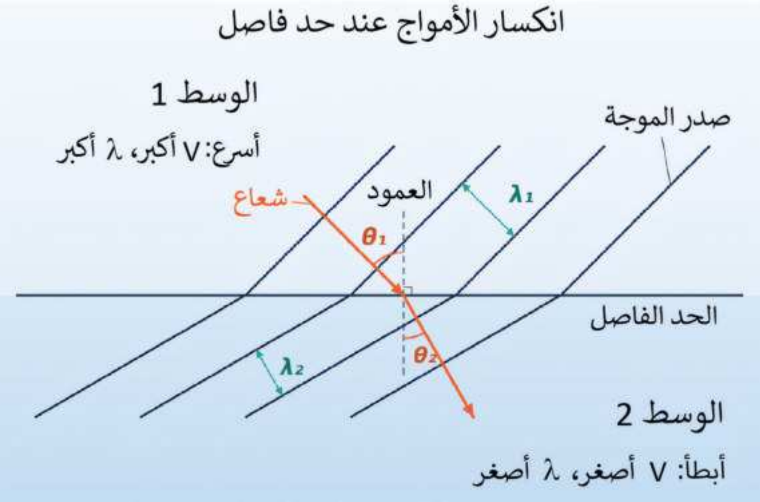
يكون الانحناء صغيرًا وتتحرك القمم بسرعة، لذا قدِّر الزاوية من رسمك، لا بالملاحظة المباشرة في الوقت الفعلي.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، دارت قمة تدخل إلى المنطقة الضحلة الأبطأ سرعة حتى أصبحت أقرب إلى التوازي مع الحد الفاصل، بينما بقي معدل وصول القمم ثابتًا. وقد يُتوقَّع أن تستمر قمم الأمواج في اتجاهها الأصلي أو أن تنحرف بفعل الرياح، لكن الملاحظات تُظهر أن الانكسار يحدث بسبب تغيُّر سرعة الطور بسبب اختلاف درجة العمق. وتشير هذه الأدلة إلى النموذج التالي.

صدر (مقدمة) الامواج والأشعة:

مقدمة الموجة الموجة هو خط أو سطح يصل نقاط موجة متطابقة الطور. وبالنسبة لموجات الماء، يمكن تمثيل صدر الموجة بخط قمة. ويُرسَم الشعاع عموديًا على صدر الموجة ويُبيِّن اتجاه انتشار الموجة. وعند حد فاصل، تُقاس زاوية السقوط وزاوية الانكسار من العمود المقام، وهو خط عمودي على الحد الفاصل.



شكل (3.6.2): يتغير اتجاه الموجة والمسافة بين الموجات عن الحد الفاصل

لماذا يُسبب تغيّر سرعة الموجة انكسارًا:

عندما يصل صدر الموجة إلى حد فاصل بزاوية، يدخل أحد جانبَي صدر الموجة الوسط الجديد قبل الجانب الآخر. وإذا اختلفت سرعة الموجة في الوسط الجديد، يُغيِّر ذلك الجانب سرعته قبل الآخر، مما يجعل صدر الموجة يدور. هذا التغيّر في اتجاه الانتشار يسمى بالانكسار.

إذا دخلت الموجة وسطًا أبطأ، ينكسر الشعاع نحو العمود المقام. وإذا دخلت وسطًا أسرع، ينكسر الشعاع بعيدًا عن العمود المقام. ويحدد المصدر تردد الموجة، ويبقى ثابتًا وهي تعبر الحد الفاصل. وبما أن v = fλ، فإن انخفاض سرعة الموجة (v) عند تردد ثابت (f) يجعل الطول الموجي (λ) ينخفض.

علاقة الانكسار:

بالنسبة لموجات تعبر حدًا فاصلًا، $\dfrac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \dfrac{v_1}{v_2} = \dfrac{\lambda_1}{\lambda_2}$

وبالنسبة للضوء، يُكتَب قانون سنِل غالبًا بصورة: $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$

حيث n معامل الانكسار.

الانكسار:

انحراف اتجاه انتشار الموجة عند عبورها حدًا فاصلًا بين وسطين، ناتجًا عن تغيّر سرعتها من وسط إلى آخر.

نصيحة امتحانية:

إذا رمز $_1n_2$ إلى معامل انكسار الوسط 2 بالنسبة للوسط 1، فإن:

$$_1n_2 = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

يضع زاوية السقوط في البسط؛ وتقول صيغة أخرى إن: $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$، وهو يعبر عن الأمر نفسه، إذ أن $_1n_2 = \frac{n_2}{n_1}$.

نقطة

! عندما تنتشر موجة خلال الفراغ أو الوسط، فإن المكان الهندسي لجميع النقاط التي تهتز في الطور نفسه يُسمّى جبهة الموجة (Wavefront).

تتحرك جبهة الموجة مع الزمن في اتجاه عمودي عليها. ويُسمّى السهم المرسوم عموديًا على جبهة الموجة وفي اتجاه انتشار الموجة شعاعًا (Ray).

! الزاوية theta 1 بين العمود المقام (Normal) والشعاع الساقط تُسمّى زاوية السقوط (Angle of incidence).

! الزاوية theta 2 بين العمود المقام والشعاع المنكسر تُسمّى زاوية الانكسار (Angle of refraction).

عندما تنتقل موجة من الوسط 1 حيث ان سرعتها v_1 وطولها الموجى λ_1 الى الوسط 2 حيث سرعتها v_2 وطولها الموجى λ_2، فإن التردد لا يتغير، ولذلك:

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = {}_1n_2$$

حيث إن ${}_1n_2$ هو معامل انكسار الوسط 2 بالنسبة إلى الوسط 1.

ويمكن كتابة العلاقة في صورة قانون سنل للانكسار (Snell's law):

$$n_1\sin\theta_1 = n_2\sin\theta_2$$

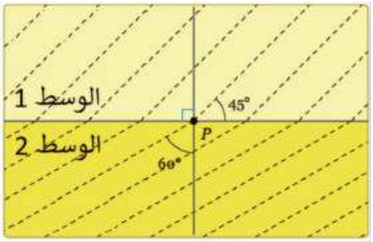
صندوق المعادلات:

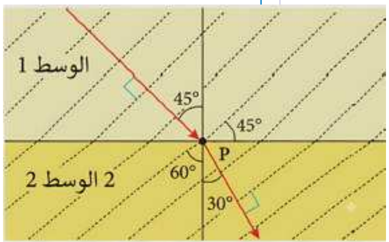
انكسار الموجات:	$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$
بالنسبة للموجات:	$\dfrac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \dfrac{v_1}{v_2} = \dfrac{\lambda_1}{\lambda_2}$

تطبيق سريع:

تعبر موجة حدًا فاصلًا بزاويتين $\theta_1 = 45°$ و $\theta_2 = 30°$ (خذ $\sqrt{2} = 1.4$). **أوجد** نسبة السرعتين.

مثال محلول:

الموقف:	الخطوط المتقطعة في الشكل هي صدر الموجات، بينما تمر موجات ماء من الوسط 1 إلى الوسط 2. الطول الموجي للموجة الساقطة في الوسط 1 هو **1.4 cm** والتردد **50 Hz**. ويصنع الشعاع زاوية **45°** مع العمود المقام في الوسط 1 و **30°** في الوسط 2. خذ $\sqrt{2} = 1.4$. أوجد (أ) معامل انكسار الوسط 2 بالنسبة للوسط 1. (ب) سرعتَي الموجة في الوسطين. (جـ) الطول الموجي في الوسط 2.  شكل (4.6.2): زاوية سقوط مقدمة الموجة 45° في الوسط 1 وزاوية الانكسار 60° في الوسط 2.

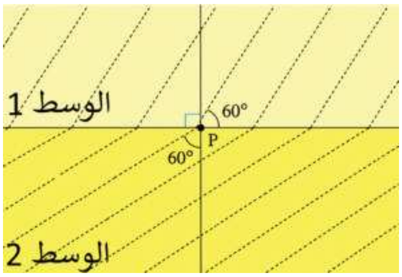


المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** $\lambda_1 = 1.4\,\text{cm} \cdot f = 50\,\text{Hz} \cdot \theta_1 = 45^\circ \cdot \theta_2 = 30^\circ \cdot \sqrt{2} = 1.4$ **المطلوب:** $1\text{-}2 =? \cdot v_1 =? \cdot v_2 =? \cdot \lambda_2 =?$
التمثيل:	في الوسط 2، تكون جبهات الموجة متقاربة أكثر، وتكون أقرب إلى الحد الفاصل (أي بزاوية أصغر)، لذلك ينحني الشعاع نحو العمود المقام $\theta_1 < \theta_2$ الوسط 2 هو الوسط الأبطأ. ويظل التردد ثابتًا عند عبور الحد الفاصل، بينما تتغير فقط السرعة v والطول الموجي
الاستراتيجية:	ارسم العمود المقام، اقرأ θ_1 و θ_2، ثم استخدم النسبة الثابتة الواحدة $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$ واستنتج كل مجهول.
الحل الموضح:	$n_{12} = \frac{\sin 45^\circ}{\sin 30^\circ} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times 2 = \sqrt{2} = 1.4$ $v_1 = f\lambda_1 = 50 \times 1.4 = 70\ \text{cm s}^{-1}$ $v_2 = \frac{v_1}{\sqrt{2}} = \frac{70}{\sqrt{2}} \approx 50\ \text{cm s}^{-1}$ $\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{\sqrt{2}} = \frac{1.4}{\sqrt{2}} \approx 1.0\ \text{cm}$ ${}_1n_2 = 1.4 \quad v_1 = 70\ \text{cm s}^{-1} \quad v_2 = 50\ \text{cm s}^{-1}$ $\lambda_2 = 1.0\ \text{cm}$
منطقية الحل:	ينكسر الشعاع مقتربًا الشعاع نحو العمود المقام في الوسط 2، لذا فإن الوسط 2 أبطأ. لذا $v_1 < v_2$ و $\lambda_1 < \lambda_2$، بينما يبقى التردد دون تغيير.
فسِّرها بنفسك:	استُخدم التردد مرة واحدة فقط — لإيجاد v_1. لماذا لم يُحتَج إليه مرة أخرى لإيجاد v_2؟

حاول بنفسك: تعبر موجات ماء من الوسط 1 إلى الوسط 2، بحيث يصنع الشعاع زاوية 45° مع العمود المقام في الوسط 1 و60° في الوسط 2؛ والسرعة في الوسط 1 هي $60\,\text{cm s}^{-1}$ والتردد 5.0 Hz (خذ $\sqrt{2} = 1.4$ ، $\sqrt{3} = 1.7$). أوجد المعامل النسبي n_{12} وسرعة الموجة في الوسط 2، واذكر أي الوسطين أسرع.

حاول:

الخطوط المتقطعة في الشكل هي صدر الموجات، بينما تمر موجات ماء من الوسط 1 إلى الوسط 2. ويصنع الشعاع زاوية 60° مع العمود المقام في الوسط 1 و30° في الوسط 2. وسرعة الموجة الساقطة في الوسط 1 هي $30\,\text{cm s}^{-1}$ والتردد 4.0 Hz. خذ $\sqrt{3} = 1.7$. أوجد ما يلي لأقرب رقمين معنويين.



(أ) ارسم، على الشكل، الشعاع المُبيِّن للاتجاه الذي تنتشر به الموجة في الوسط 1 والوسط 2.

(ب) أوجد معامل انكسار الوسط 2 بالنسبة للوسط 1.

(جـ) أوجد الطولين الموجيين للموجتين في الوسط 1 والوسط 2، بالسنتيمتر.

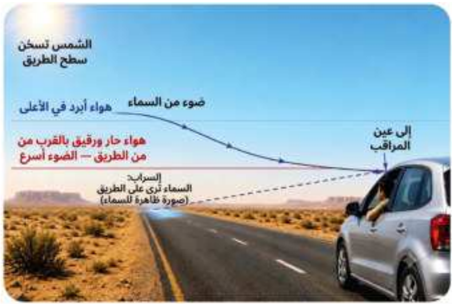
(د) أوجد سرعة الموجة في الوسط 2، بـ cm s^{-1}.

سؤال للربط:

كيف يرتبط نموذجا الموجة والشعاع للانكسار؟

في سياق جديد — سراب فوق طريق صحراوي:

على طريق صحراوي حار، يكون الهواء فوق سطح الطريق مباشرة أسخن وأقل كثافة من الهواء فوقه. وينتقل الضوء بصورة أسرع في هذا الهواء الساخن. وبينما يمر الضوء عبر طبقات من الهواء يتغيَّر معامل انكسارها تدريجيًّا، ينكسر مساره تدريجيًّا. ويمكن أن يصل ضوء من السماء إلى عين المُراقِب من اتجاه قريب من سطح الطريق، لذا قد يبدو الطريق وكأنه يعكس السماء مثل الماء.


الشمس تسخن سطح الطريق
ضوء من السماء
هواء أبرد في الأعلى
هواء حار ورقيق بالقرب من من الطريق — الضوء أسرع
إلى عين المراقب
السراب: السماء ترى على الطريق (صورة ظاهرة للسماء)

شكل (7.6.2) : ينحني الضوء إلى أعلى بسبب الهواء الساخن بالقرب من سطح الطريق، مما يؤدي إلى ظهور السراب.

دورك الآن: تُغيِّر كل طبقة رقيقة من الهواء بالقرب من الطريق سرعة الضوء قليلًا. فسِّر لماذا ينكسر شعاع الضوء بالقرب من الطريق. اذكر ما إذا كان الشعاع ينحني نحو العمود المقام أم بعيدًا عنه وهو يدخل طبقة أسرع.

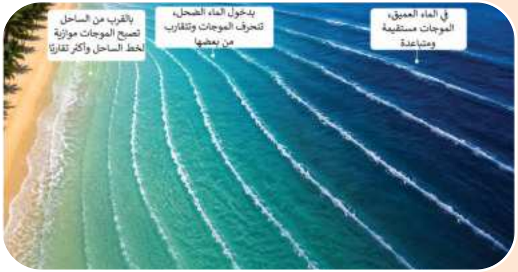
طبيعة العلم — العلم مسعى مشترك — قانون واحد، واسمان، وبلدان:

غالبًا ما يُسمى قانون الانكسار قانون سنِل، نسبة إلى ويليبرورد سنِليوس، الذي اشتقه نحو عام ١٦٢١. ونشر رينيه ديكارت لاحقًا العلاقة نفسها عام ١٦٣٧ في كتابه «الديوبتريك». ويسمح نشر النتائج العلمية لعلماء آخرين باختبارها واستخدامها وتطويرها.

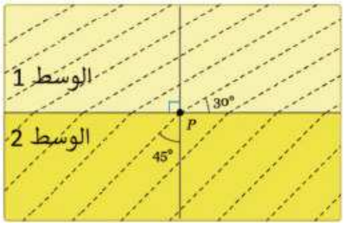
دورك الآن: اقترح سببًا واحدًا يجعل اكتشافًا مكتوبًا لكنه ظل غير منشور، كاكتشاف سنِليوس، يُسهم في العلم بصورة أقل من اكتشاف منشور، كاكتشاف ديكارت.

سؤال الدرس، وإجابته:

عندما تعبر موجة إلى وسط تنتقل فيه بسرعة مختلفة، لماذا يتغير اتجاهها عند الحد الفاصل؟ لأن أحد طرفي جبهة (صدر) الموجة التي تلتقي بالحد الفاصل بزاوية مائلة يغير سرعته قبل الطرف الآخر، مما يؤدي إلى انحراف خط القمة. ويحدد المصدر التردد ولا يمكن أن يتغيَّر، لذا وبموجب $v = f\lambda$، تقابل سرعة أصغر طولًا موجيًّا أصغر. وترتبط الزاويتان عندئذٍ بالسرعتين بالعلاقة $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$ — النسبة الثابتة $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$. وينكسر الشعاع نحو العمود المقام عندما تدخل الموجة وسطًا أبطأ، وبعيدًا عن العمود المقام عندما تدخل وسطًا أسرع. ويبقى التردد ثابتًا وهي تعبر الحد الفاصل، لذا يتغيَّر طولها الموجي بما يتناسب مع سرعتها.


في الماء العميق، الموجات مستقيمة ومتباعدة
بدخول الماء الضحل، تنحرف الموجات وتتقارب من بعضها
بالقرب من الساحل تصبح الموجات موازية لخط الساحل وأكثر تقاربًا

تمرين:



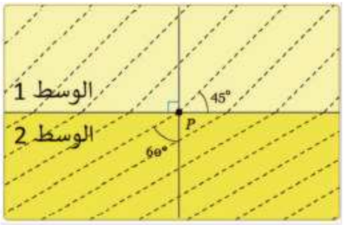
(أ) الخطوط المتقطعة في الشكل على الشمال تمثّل صدر الموجات عندما تنتقل موجات ماء من الوسط 1 إلى الوسط 2. سرعة الموجة الساقطة في الوسط 1 هي $35\ \text{cm/s}$، والتردد $50\ \text{Hz}$.

(i) ارسم، في الشكل، اتجاه الموجة المارة بالنقطة P في الوسطين 1 و2.

(ii) أوجد معامل انكسار الوسط 2 بالنسبة للوسط 1.

(iii) أوجد سرعة الموجة في الوسط 2، بـ cm/s.

(iv) أوجد الطول الموجي للموجة في الوسط 2، بالسنتيمتر.

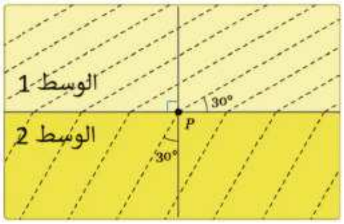


(ب) سرعة الموجة الساقطة في الوسط 1 هي $2.0\ \text{m/s}$، والتردد $5.0\ \text{Hz}$.

(i) أوجد معامل انكسار الوسط 2 بالنسبة للوسط 1.

(ii) أوجد سرعة الموجة في الوسط 2، بـ m/s.

(iii) أوجد الطولين الموجيين في الوسطين 1 و2، بالمتر.



(جـ) الطول الموجي للموجة الساقطة في الوسط 1 هو $2.0\ \text{cm}$، والتردد $5.0\ \text{Hz}$.

(i) ارسم، في الشكل، اتجاه الموجة المارة بالنقطة P في الوسطين 1 و2.

(ii) أوجد معامل انكسار الوسط 2 بالنسبة للوسط 1.

(iii) أوجد سرعتَي الموجة في الوسطين 1 و2، بـ cm/s.

(iv) أوجد الطول الموجي للموجة في الوسط 2، بالسنتيمتر.

نصيحة امتحانية:

اعرض علاقة نسبة الجيب $\dfrac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$ والتعويض الذي يليها في كل إجابة؛ يمنح الممتحنون درجات على طريقة الحل.

سؤال بأسلوب الامتحان:

تمر موجة ماء من الوسط 1 إلى الوسط 2. ويصنع الشعاع زاوية 60° مع العمود المقام في الوسط 1 و45° في الوسط 2 (خذ $\sqrt{3} = 1.7$، $\sqrt{2} = 1.4$). أوجد معامل انكسار الوسط 2 بالنسبة للوسط 1، **واذكر** ما إذا كانت الموجة تتسارع أم تتباطأ عند العبور.

الدرس ٢-٧ — تداخل موجات الصوت

؟ سؤال الدرس:

عندما يُصدر مكبّرا صوت النغمة المستقرة نفسها، لماذا يكون الصوت عاليًا عند بعض المواضع وشبه صامت عند أخرى؟

ستتعلم أن:

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. تفسر كيف يُنتج مصدرا صوت مترابطان مواضع تداخل بنَّاء وهدَّام.

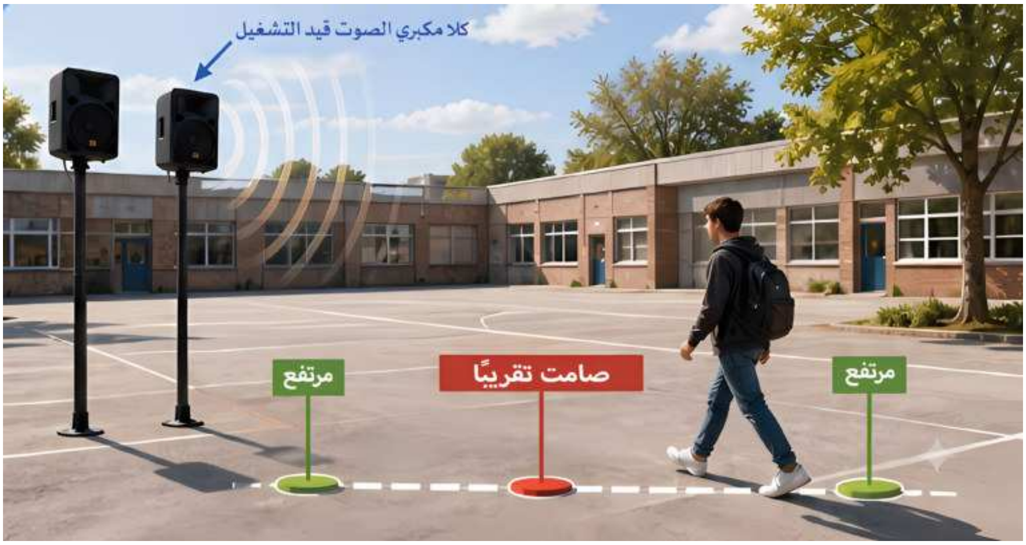
٢. تتنبأ بما إذا كان التداخل بنَّاءً أم هدَّامًا عند نقطة من فرق مسارها.

٣. تحدد الطول الموجي وتردد الصوت باستخدام قياسات التداخل.

حقيقة أساسية:

للنغمة النقية تردد واحد (f). وفي الهواء، يرتبط طولها الموجي بسرعة الصوت بالعلاقة: $v = f\lambda$. عندما تتداخل موجتان صوتيتان، فإن الإزاحة الناتجة لجزيئات الهواء هي المجموع الجبري للإزاحات الفردية. هذا هو مبدأ التراكب.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر:


كلا مكبري الصوت قيد التشغيل
مرتفع
صامت تقريبًا
مرتفع

شكل (1.7.2): المشي بالقرب من مصدرَي صوت يُظهر نقاطًا يكون عندها الصوت مرتفعًا وأخرى يكون عندها شبه صامت.

قبل إذاعة طابور الصباح، يختبر الحارس مكبِّرَي صوت الفناء بنغمة ثابتة واحدة. وبينما تعبر الفناء، تمشي عبر منطقة تكاد تصبح فيها النغمة غير مسموعة، وبعد خطوتين تعود إلى أقصى شدتها. وصديقك، الذي يعبر في مكان آخر، قد لا يكتشف مثل هذا التباين. ويبقى مكبِّرا الصوت يعملان طوال الوقت.

توقَّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) تمشي ببطء عبر الفناء بينما تُعزَف النغمة. ماذا ستسمع: الصوت نفسه في كل مكان، أم انخفاضًا تدريجيًّا في الشدة مع المسافة، أم نمطًا متكررًا من العلو والهدوء؟

(ب) يدَّعي صديق أنه مع تشغيل مكبِّرَي الصوت، يجب أن تكون كل نقطة في الفناء أعلى صوتًا مما لو كان مكبِّرٌ واحدٌ يعمل. هل توافقه؟

حدِّد مواضع التداخل البنَّاء والهدَّام للصوت:

ما ستفعله: تستخدم مصدرَي صوت مترابطين لتحديد مواضع التداخل البنَّاء والهدَّام.

الزمن: 12 دقيقة.

ما تحتاجه:

- هاتف بتطبيق مولِّد نغمات.
- سماعات أذن سلكية.
- شريط لاصق.
- مسطرة متر أو شريط قياس.
- علامات ورقية.
- مساحة هادئة مفتوحة.

سلامة الصوت: أبقِ مستوى الصوت منخفضًا بما يكفي ليكون مريحًا وآمنًا.

الخطوات:

١ ثبِّت سماعتَي الأذن بشريط على حافة طاولة، متجهتين نحو المُراقِب ومتباعدتين نحو 0.50 m.

٢ اضبط تطبيق مولِّد النغمات على نغمة ثابتة مقدارها 1700 Hz بمستوى صوت آمن ومنخفض.

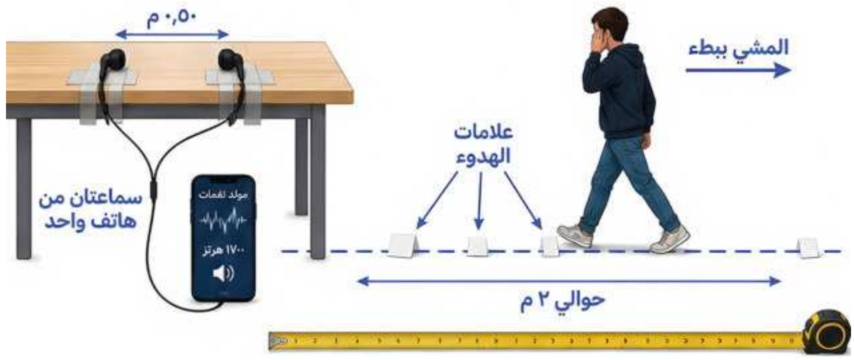
٣ امشِ ببطء على طول خط على بُعد نحو 2 m من الطاولة، موازيًا للخط الواصل بين سماعتَي الأذن.

٤ أبقِ أذنًا واحدة متجهة نحو السماعتين وغطِّ الأذن الأخرى.

٥ ضع علامة ورقية عند كل موضع تكون فيه شدة الصوت عند أدنى مستوى أو قريبة منه.

٦ كرر المشي واحتفظ فقط بالمواضع القابلة للتكرار.

٧ كرر باستخدام 3400 Hz وقارن التباعد بين المواضع الهادئة المتجاورة.



المحاولة	التردد (Hz)	عدد المواضع الهادئة	التباعد بين المواضع الهادئة المتجاورة (m)
1	1700		
2	1700		
3	1700		
4	3400		

حلِّل ما جمعته:

(أ) بالقرب من منتصف المسار، هل المواضع الهادئة متباعدة بانتظام تقريبًا؟ ماذا يحدث لهذا التباعد عند مضاعفة التردد؟

(ب) تُرسَل الإشارة نفسها إلى كلتا السماعتين. لماذا يجب أن تكون المواضع الهادئة ناتجة عن تداخل في الهواء بين المصدرين والأذن؟

اكتب تفسيرك في سطرين على الأكثر قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

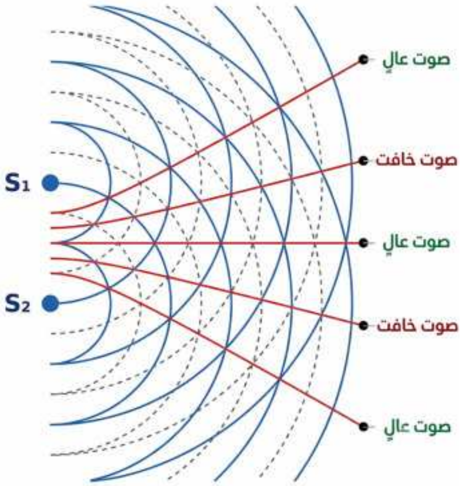
في نشاط الاستكشاف، وجدت أن المواضع الهادئة بالقرب من المنتصف متباعدة بانتظام تقريبًا. وعند مضاعفة التردد قلّل ذلك التباعد بين المواضع الهادئة المتجاورة. وخلال كل محاولة، بقيت إشارة الصوت مستقرة مع تغيُّر موضع الاستماع، لذا نتج التباين في شدة الصوت عن تراكب موجتَي الصوت في الهواء. ويفسر النموذج التالي هذا النمط.

تراكب موجتَي صوت:

الصوت موجة طولية. وعندما تتراكب موجتا صوت عند نقطة، تكوِّن الإزاحة المحصلة لجسيمات الهواء المجموع الجبري للإزاحتين الناتجتين عن الموجتين. وإذا وصلت الموجتان بالطور نفسه، يحدث تداخل بنَّاء، وللسعتين المتقاربتين، يكون الصوت أعلى. وإذا وصلتا بطورين متعاكسين بسعتين متساويتين، يحدث تداخل هدَّام ويقل الصوت كثيرًا.

حقيقة أساسية:

تعمل السماعتان بوصفهما مصدرين مترابطين؛ لأنهما تستقبلان الإشارة نفسها، ولهما التردد نفسه وعلاقة طورثابتة.



قاعدة فرق المسار وكيفية قياسها:

عند نقطة (P)، فرق المسار هو: $\Delta d = |S_1P - S_2P|$، حيث (S_1P) و (S_2P) هما المسافتان من مصدرَي الصوت إلى النقطة.

بالنسبة لمصدرين مترابطين يهتزان بالطور نفسه: يحدث التداخل البنَّاء عندما $\Delta d = n\lambda$.
ويحدث التداخل الهدَّام عندما $\Delta d = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$، حيث .... ،3 ،2 ،1 ،0 = n

نقطة

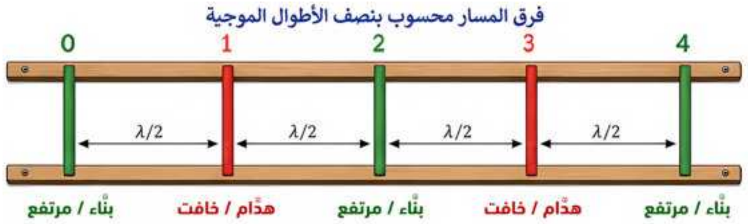
- بما أن الموجات الصوتية هي أيضًا موجات، فإنها تُظهر الظواهر نفسها التي تظهرها الموجات الأخرى. والموجة الصوتية موجة طولية؛ وعندما يلتقي صوتان، فإن كل جسيم من جسيمات الهواء يتأثر بـ المجموع الجبري للإزاحتين الناتجتين عن الموجتين.
- عندما يهتز المصدران S_1 و S_2 فى الطور نفسه وصدران موجات لها الطول الموجى λ فعند الرصد P التداخل البنّاء (Constructive interference) $|PS_1-PS_2| =$ عدد زوجي lambda/2X أي أن فرق المسار يكون $\Delta d = n\lambda$، حيث $n = 0,1,2,3,...$
التداخل الهدّام (Destructive interference) (عدد فردي) $|PS_1-PS_2| = \lambda / 2 \times$ أي أن فرق المسار يكون: $\Delta d= (n +1 /2)\lambda$، حيث $n = 0,1,2,3,....$ عندما يكون المصدران خارج الطور (Out of phase)
- عندما يكون المصدران خارج الطور، فإن مواضع التداخل البنّاء والهدّام تنعكس مقارنةً بالحالة التي يكون فيها المصدران في الطور.

صندوق المعادلات:

التداخل البنَّاء (للمصادر المترابطة ومتطابقة الطور):	فرق المسار = $n\lambda$
التداخل الهدَّام:	فرق المسار = $(n+\frac{1}{2})\lambda$
سرعة الموجة:	$v = f\lambda$

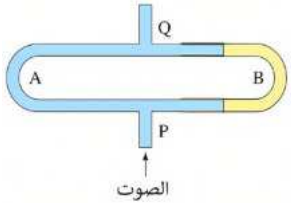
العد بأنصاف الأطوال الموجية:

يمكن عدّ فرق المسار بمضاعفات $(\lambda/2)$. ويقابل عدد زوجي من أنصاف الأطوال الموجية تداخلًا بنَّاءً للموجات من مصادر متطابقة الطور، بينما يقابل عدد فردي تداخلًا هدَّامًا.



أنبوبة كوينك لقياس الطول الموجي للصوت: أنبوبة كوينك جهاز يقيس الطول الموجي للصوت باستخدام تداخل الصوت. يُقسَّم الصوت من مصدر واحد بواسطة فرعيّ أنبوبة ثم يُعاد دمجه عند المخرج. وبسحب أحد الفرعين (أنبوبة على شكل حرف U) وتغيير طول المسار، يتغيّر «فرق المسار» للموجتين. وباستغلال ظاهرة بلوغ شدة الصوت الحد الأدنى بسبب التداخل الهدَّام عندما يكون فرق المسار مضاعفًا فرديًا لنصف طول موجي، يمكن حساب الطول الموجي لموجة الصوت بدقة من مسافة سحب الفرع المنزلق.

مثال محلول:

الموقف:	في أنبوبة كوينك الموضح، يُقسَّم الصوت الداخل عند P إلى مسارين ويُعاد دمجه عند Q. وعندما يكون الأنبوبة B مُدخَلًا بالكامل، يتساوى طولا المسارين. وبينما يُسحَب الأنبوبة B ببطء، يحدث أول حد أدنى في شدة الصوت عندما يُسحَب الأنبوبة بمقدار $x = 8.5\ \text{cm}$ وسرعة الصوت $3.4 \times 10^2\ \text{m/s}$. أوجد: (i) الطول الموجي λ للصوت، بالمتر؛ (ii) تردد الصوت f، بالهرتز.  شكل توضيحي: أنبوبة كوينك
المعطيات والمطلوب:	السحب $x = 8.5\ \text{cm}$، $v = 3.4 \times 10^2\ \text{m s}^{-1}$، أول حد أدنى عند Q ⇐ λ = ؟، f = ؟
التمثيل:	رسم قبل/بعد: طول الفرع A ثابت؛ ويكتسب طول الفرع B مقدار x صعودًا في أحد ذراعيه وx نزولًا في الآخر - كل سنتيمتر من السحب يزيد طول الفرع بمقدار سنتيمترين.

كُتيِّب البيانات:
الشرطان مطبوعان في قسم الموجات بالكُتيِّب — ومهمتك في الامتحان هي إيجاد فرق المسار والعدد الصحيح n، لا تذكُّرهما.

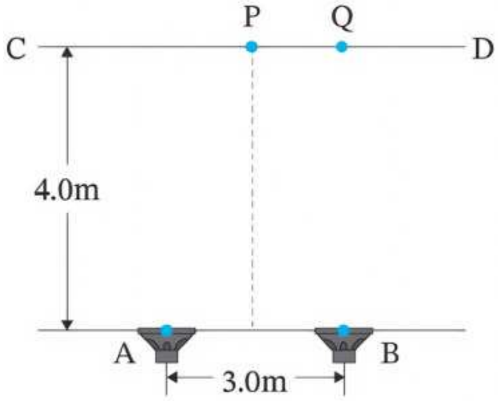
الاستراتيجية:	أوجد فرق المسارين الفرعين أولًا؛ وعبِّر عنه كعدد من أنصاف الأطوال الموجية – عدد زوجي ($n\lambda$) يُعطي تداخلًا بنَّاءً، وعدد فردي $(n+\frac{1}{2})\lambda$ يُعطي تداخلاً هدَّامًا -- ثم حدِّد λ.
الحل الموضح:	1) $\Delta d = 2\times 8.5\,\text{cm} = 17\,\text{cm} = 0.17\,\text{m}$. 2) أول حد أدنى: $\frac{\lambda}{2} = 0.17\,\text{m}$، إذن $\lambda = 0.34\,\text{m}$. 3) $f = \frac{\lambda}{2} = \frac{3.4\times10^2}{0.34} = 1.0\times10^3\,\text{Hz}$.
منطقة الحل:	يقع 1.0×10^3 Hz ضمن النطاق المسموع؛ وسحب بضعة سنتيمترات يُعطي طولًا موجيًّا مقداره بضع عشرات من السنتيمترات، وهذه رتبة مقدار متوقَّعة للصوت المسموع.
فسِّرها بنفسك:	لماذا يزيد سحب الفرع المنزلق بمقدار x فرق المسار بمقدار $2x$ بدلًا من x؟

حاول بنفسك: نفس الجهاز، تردد مختلف. عند إعادة إدخال الأنبوبة B إلى موضعها، يظهر (يصدر) صوت جديد ثابت التردد عند النقطة (P)؛ ويحدث الحد الأدنى الأول لشدة الصوت عندما يكون المنزلق قد خرج مسافة 5.0 سم فقط. احسب الطول الموجي والتردد لهذا الصوت.

تطبيق سريع:

يُصدر مكبِّرًا صوت نغمة واحدة بالطور نفسه؛ وعند مقعدك يختلف المساران بمقدار 0.51 m ويكون الطول الموجي 0.34 m. اذكر ما إذا كان الصوت عاليًا أم هادئًا، واذكر عدد أنصاف الأطوال الموجية في فرق المسار.

حاول:



(أ) كما في الشكل، يُصدر مكبِّرا صوت صوتًا بالتردد نفسه. وبينما يتحرك مُراقِب على طول الخط CD، الذي يبعد 4.0 m عن الخط AB، تكون شدة الصوت أدنى ما يمكن عند النقطة P، تقاطع الخط CD مع العمود المنصِّف لـ AB. وبينما يبتعد المُراقِب عن تلك النقطة على طول CD، تزداد شدة الصوت تدريجيًّا وتبلغ أقصاها عند النقطة Q، التي تبعد 1.5 m عن النقطة P.

(i) حدِّد ما إذا كانت اهتزازات مصدرَي الصوت A وB متطابقة الطور أم متعاكسة الطور.

(ii) أوجد الطول الموجي للصوت الصادر من المكبِّرين، بالمتر.

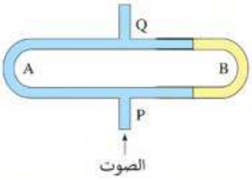
حقيقة أساسية:

يحتوي العنصر (أ) على مثلث 5-4-3: تُوجَد AQ باستخدام نظرية فيثاغورس؛ و BQ هي ببساطة 4.0 m بين الخطين -- قبل تطبيق أي تحليل موجي.

(ب) في الجهاز الموضح في الشكل (أنبوبة كوينك)، يُقسَّم الصوت الداخل عند P إلى مسارين، الأنبوبة A على اليسار والأنبوبة B على اليمين، ويُعاد دمجه عند Q. وعندما يكون الأنبوبة B مُدخَلًا بالكامل، يتساوى طولا المسارين. وبينما يُدخَل صوت ثابت التردد عند P، يُسحَب الأنبوبة B ببطء، وتصبح شدة الصوت أدنى ما يمكن لأول مرة عندما يُسحَب بمقدار 5.0 cm. لتكن سرعة الصوت v تساوي $3.4\times10^2\,\text{m s}^{-1}$.

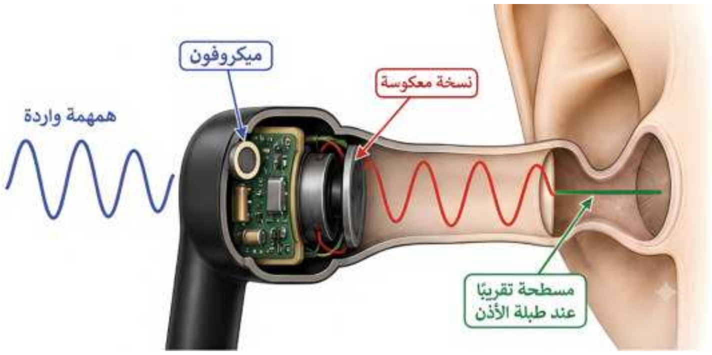
(i) أوجد الطول الموجي λ للصوت، بالمتر.

(ii) أوجد تردد الصوت f، بالهرتز.



في سياق جديد — سماعات إلغاء الضوضاء

تَستخدم سماعات إلغاء الضوضاء ميكروفونات لاكتشاف الصوت الوارد. ثم تُنتج الدوائر الإلكترونية موجة صوتية بالتردد نفسه وبسعة مساوية تقريبًا، لكن بطور معاكس. وعند طبلة الأذن، تتراكب الموجتان وتقلِّلان تغيُّر الضغط المحصَّل. وهذا تداخل هدَّام.



فسِّر: لماذا تُقلِّل سماعات إلغاء الضوضاء طنين محرك ثابتًا بفعالية أكبر من صوت مفاجئ ونبضي كصوت إغلاق باب؟

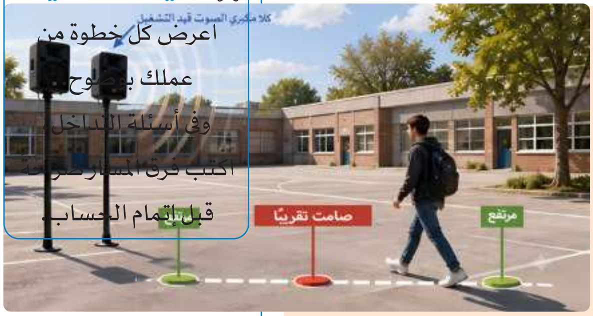
طبيعة العلم: الأدلة — التداخل دليلاً على السلوك الموجي للضوء

يُعَدُّ الموضع الهادئ في نمط تداخل مصدرين دليلًا قويًا على السلوك الموجي. فعند هذه النقطة، يتجمع اضطرابان لينتجا أثرًا محصلًا شبه صفري، وهذا لا يمكن تفسيره بنموذج بسيط لتيار جسيمات. واستخدمت تجربة الشق المزدوج ليونغ دليل تداخل مماثل لدعم النموذج الموجي للضوء.

دورك الآن: اقترح لماذا تُعَدُّ مواضع الشدة الدنيا، لا مواضع الشدة القصوى، الدليل الأقوى على أن الصوت موجة.

نصيحة امتحانية:

اعرض كل خطوة من عملك بوضوح، وفي أسئلة التداخل، اكتب فرق المسار صراحةً قبل إتمام الحساب.


كلا مكبري الصوت قيد التشغيل
مرتفع
صامت تقريبًا
مرتفع

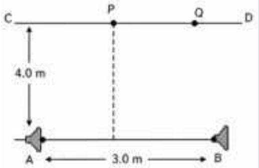
سؤال الدرس، وإجابته:

عندما يُصدر مكبِّرا صوت مترابطان ومتطابقا الطور النغمة الثابتة نفسها، تتلقى كل نقطة موجتَي صوت ربما قطعتا مسافتين مختلفتين. فإذا كان فرق المسار عددًا صحيحًا من الأطوال الموجية، تصل الموجتان بالطور نفسه وتتداخلان بشكل بنَّاء، منتجتين صوتًا عاليًا.

وإذا كان فرق المسار عددًا فرديًا من أنصاف الأطوال الموجية، تصل الموجتان بطورين متعاكسين وتتداخلان بشكل هدَّام، منتجتين موضعًا هادئًا.

تمرين:

(أ) كما في الشكل، يُصدر مكبِّرا صوت صوتًا بالطور نفسه والتردد نفسه، 1.7×10^2 Hz. لتكن P تقاطع الخط CD، الذي يبعد 4.0 m عن الخط AB، مع العمود المنصِّف لـ AB، ولتكن Q نقطة تبعد 1.5 m عن النقطة P. لتكن سرعة الصوت $3.4 \times 10^2\ \mathrm{m\,s^{-1}}$.



(i) أوجد الطول الموجي للصوت الصادر من المكبِّرين، بالمتر.

(ii) حدِّد ما إذا كانت النقطة Q نقطة تداخل بنّاء أم هدّام.

(ب) في الجهاز نفسه الموضح في الشكل، مع إدخال الأنبوبة B بالكامل مرة أخرى بحيث يتساوى المساران، يُدخَل صوتٌ ثابتُ التردد عند P. ويُسحَب الأنبوبة B ببطء، وتصبح شدة الصوت أدنى ما يمكن لأول مرة عندما يُسحَب بمقدار 17 cm. لتكن سرعة الصوت v تساوي $3.4 \times 10^2 \text{ m s}^{-1}$.

(i) أوجد الطول الموجي λ للصوت، بالمتر.

(ii) أوجد تردد الصوت f، بالهرتز.

(جـ) في الجهاز نفسه، مع إدخال الأنبوبة B بالكامل مرة أخرى، يُدخَل صوتٌ ثابتُ التردد عند P. ويُسحَب الأنبوبة B ببطء، وتكون شدة الصوت أدنى ما يمكن لأول مرة عندما يُسحَب بمقدار 10 cm. لتكن سرعة الصوت v تساوي $3.4 \times 10^2 \text{ m s}^{-1}$.

(i) أوجد الطول الموجي λ للصوت، بالمتر.

(ii) أوجد تردد الصوت f، بالهرتز.

(iii) إذا أُجريت التجربة نفسها باستخدام صوت له ضعف التردد، أوجد المسافة التي يُسحَب بها الأنبوبة B لتكون شدة الصوت أدنى ما يمكن لأول مرة، بالمتر.

سؤال بأسلوب الامتحان:

يُصدر مكبِّرا صوت، متصلان بمولِّد الإشارة نفسه، موجات صوتية بالطور نفسه.
وعند النقطة M تكون شدة الصوت شبه صفرية. فسِّر، بدلالة فرق المسار وفرق الطور، لماذا تكون شدة الصوت صغيرة جدًا عند M.

الدرس ٢-٨ — تأثير دوبلر

؟ سؤال الدرس:

لماذا تتغيَّر درجة نغمة صفارة الإنذار المُلاحَظة بينما تمر سيارة إسعاف بمُراقِب؟

ستتعلم أن:

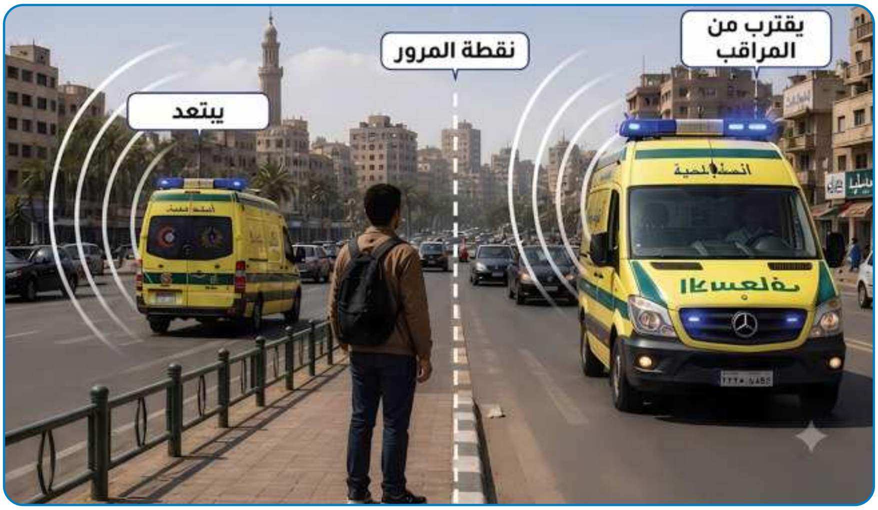
بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. تفسر كيفيًا لماذا تُغيِّر الحركة النسبية بين مصدر موجة ومُراقِب التردد المُلاحَظ.

٢. ترسم مخططات صدر الموجات لمصدر متحرك وتحدد مناطق الطول الموجي الأقصر والأطول.

٣. تستخدم علاقة دوبلر التقريبية للضوء: $\frac{v}{c} \approx \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر



شكل (4.5.1): تتقارب الموجات أمام المصدر وتتباعد خلفه.

⭐ حقيقة أساسية:

بالنسبة للصوت في هواء ساكن، تُحدَّد سرعة الموجة بخصائص الهواء. وترتبط الكميات v وf وλ بالعلاقة: $v = f\lambda$.

قف في شارع مزدحم بينما تمر سيارة إسعاف، واستمع. يتفق الجميع على أن صفارة الإنذار تبدو مختلفة عندما تمر السيارة. لكن كثيرًا من المستمعين غير متأكدين مما يتغيَّر بالضبط، أو متى.

توقَّع قبل أن تستمر:

(أ) بينما تقترب سيارة إسعاف بسرعة ثابتة، هل ترتفع درجة النغمة المُلاحَظة باستمرار، أم تبقى ثابتة تقريبًا حتى تمر سيارة الإسعاف؟

(ب) بينما تقترب سيارة الإسعاف بسرعة ثابتة، هل تكون درجة النغمة المُلاحَظة أعلى من، أم أقل من، أم تساوي درجة النغمة الصادرة؟

استكشف — لاحظ ازاحة دوبلر لمصدر صوت متحرك

ما ستفعله: تُحرِّك مصدر صوت بالنسبة لمستمع وتستمع إلى تغيّرات في درجة النغمة المُلاحَظة.

الزمن: 12 دقيقة.

ما تحتاجه:

- هاتف بتطبيق مولِّد نغمات، مضبوط على 600 Hz.
- مساحة مفتوحة وخالية.
- هاتف ثانٍ أو مسجِّل للملاحظات.

الخطوات:

١ يقف طالب ثابتًا بوصفه المستمع.

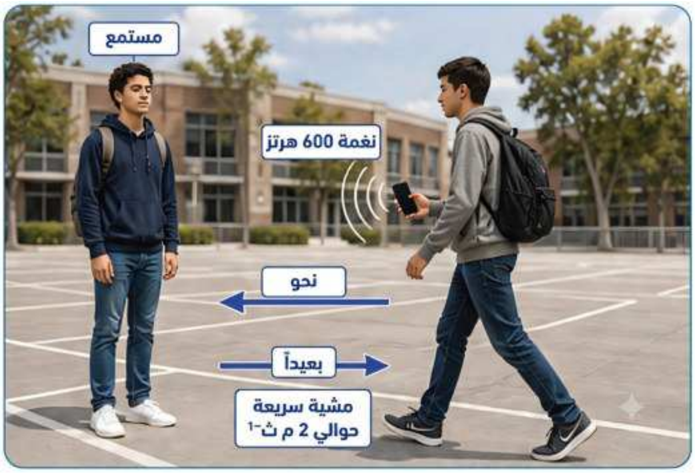
٢ يحمل طالب ثانٍ الهاتف بينما يُصدر نغمة ثابتة (600 Hz). ويسجِّل المستمع هذه النغمة بوصفها درجة النغمة المرجعية.

٣ يتحرك الطالب الثاني بعدها مباشرة نحو المستمع بسرعة مشي ثابتة، ثم يمر ويبتعد.

٤ يسجِّل المستمع ما إذا كانت درجة النغمة أعلى، أم أقل، أم دون تغيير أثناء الاقتراب والابتعاد.

٥ كرر الملاحظة مع مستمعين مختلفين.

ملاحظة القياس: قد يحكم مستمعون مختلفون على تغيّرات درجة النغمة بصورة مختلفة. كرر الملاحظات مع عدة مستمعين، كما هو موضح في الخطوة 5، للحصول على استنتاج أكثر موثوقية.



حركة المصدر بالنسبة للمستمع	درجة النغمة المُلاحَظة	ملاحظات
متحرك نحو المستمع		
متحرك مبتعدًا عن المستمع		
مصدر ساكن		

حلِّل ما جمعته:

(أ) أثناء الاقتراب بسرعة ثابتة، هل كانت درجة النغمة المُلاحَظة ترتفع باستمرار أم كانت ثابتة تقريبًا وأعلى من درجة النغمة المرجعية؟

(ب) بما أن إعداد تردد الهاتف لم يتغيَّر، ما الذي تغيَّر بين المصدر والمستمع؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

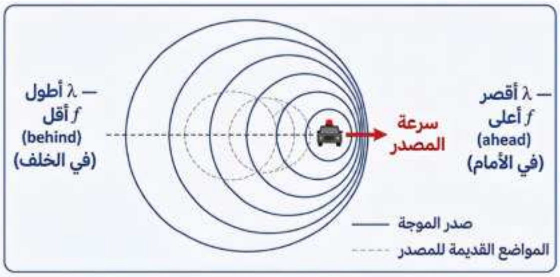
من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، كانت درجة النغمة المُلاحَظة أعلى، بينما كان المصدر يتحرك نحو المستمع وأقل بينما كان يبتعد. وبالنسبة لحركة مباشرة نحو المستمع أو بعيدًا عنه بسرعة ثابتة، يبقى التردد المُلاحَظ ثابتًا خلال كل مرحلة: أعلى أثناء الاقتراب وأقل أثناء الابتعاد. والارتفاع التدريجي توقع شائع، لكنه ليس ما يُلاحَظ. وبما أن التردد الصادر بقي ثابتًا، فإن التغيُّر في التردد المُلاحَظ نتج عن حركة المصدر بالنسبة للمستمع والهواء المحيط. ويتفق النموذج التالي مع هذا الدليل.

مصدر متحرك وتغيّر الطول الموجي

يُصدر مصدر صوت صدور موجات تنتشر عبر الهواء بسرعة الصوت. وتُحدَّد هذه السرعة بواسطة الهواء. وعندما يتحرك المصدر نحو مُراقِب، تَصدُر صدور الموجات المتتالية من مواضع أقرب إلى المُراقِب. وتكون صدور الموجات أمام المصدر أكثر تقاربًا؛ لذا يكون الطول الموجي المُلاحَظ أقصر، ويكون التردد المُلاحَظ أعلى. وخلف المصدر المتحرك، تكون صدور الموجات المتتالية أكثر تباعدًا، لذا يكون الطول الموجي المُلاحَظ أطول، ويكون التردد المُلاحَظ أقل. بالنسبة للصوت في هواء ساكن، لا تتغيَّر سرعة الصوت بحركة المصدر. وتُغيِّر حركة المصدر تباعد صدور الموجات، لا سرعة الصوت في الوسط. ولا تتغيَّر سرعة الموجة أبدًا؛ والذي يتغيَّر هو تباعد صدور الموجات.

تأثير دوبلر:
التغيُّر في التردد أو الطول الموجي المُلاحَظين لموجة بسبب الحركة النسبية بين المصدر والمُراقِب.



شكل :-2-8-3 تتقارب الموجات أمام المصدر وتتباعد خلفه

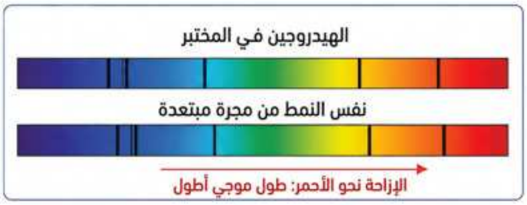
مُراقِب يتحرك نحو مصدر ساكن

إذا كان المصدر ساكنًا وتحرك المُراقِب نحوه، لا يتغيَّر الطول الموجي في الهواء، لكن المُراقِب يلتقي بالأسطح الموجية بصورة أكثر تكرارًا. لذا، يكون التردد المُلاحَظ أعلى. وإذا ابتعد المُراقِب عن المصدر، يلتقي المُراقِب بالأسطح الموجية بصورة أقل تكرارًا، لذا يكون التردد المُلاحَظ أقل.

تأثير دوبلر للضوء

بالنسبة للضوء، يُلاحَظ تأثير دوبلر عند حدوث إزاحة في الأطوال الموجية للخطوط الطيفية. فإذا كان نجم أو مجرة يبتعد عن المُراقِب، تنزاح خطوطه الطيفية نحو أطوال موجية أكبر؛ ويُسمى هذا إزاحة نحو الأحمر (تعني أن الطيف يقترب من اللون الأحمر). وإذا كان يقترب من المُراقِب، تنزاح الخطوط نحو أطوال موجية أقصر؛ ويُسمى هذا إزاحة نحو الأزرق (تعني أن الطيف يقترب من اللون الأزرق).

بالنسبة للسرعات الأصغر بكثير من سرعة الضوء: $\frac{v}{c} \approx \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ حيث v هي السرعة الشعاعية على طول خط البصر (خط النظر) وc سرعة الضوء.



نقطة

تأثير دوبلر (Doppler effect): الظاهرة التي تختلف فيها التردد المُلاحظ عن تردد المصدر بسبب الحركة النسبية بين المصدر والمراقب تُسمى تأثير دوبلر.

- عند الاقتراب ← تردد أعلى، وبالتالي نغمة أعلى.
- عند الابتعاد ← تردد أقل، وبالتالي نغمة أخفض.
- وينطبق ذلك سواء كان المصدر هو المتحرك أم المراقب.

لتكن

– v: سرعة الصوت – Vs: سرعة المصدر – Vo: سرعة المراقب

– f′: التردد الذي يسمعه المراقب – fs: تردد المصدر

وترتبط هذه الكميات بالعلاقة $f' = fs\,(v + v_0)\,/\,(v + v_0)$

حيث:

! تكون v_0 موجبة عندما يتحرك المراقب نحو المصدر * تكون v_s موجبة عندما يتحرك المصدر نحو المراقب جبهات الموجة أمام مصدر يقترب من المراقب، تكون جبهات الموجة متقاربة من بعضها، ولذلك يكون الطول الموجي المُلاحظ أقصر.

! مهم: حركة المصدر تغيّر المسافة بين جبهات الموجة، لكنها لا تغيّر سرعة الصوت في الوسط

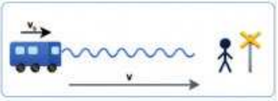
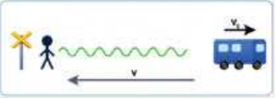
صندوق المعادلات:

إزاحة دوبلر للضوء	$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{v}{c}$

تطبيق سريع:

ينزاح خط هيدروجين في طيف مجرة بمقدار $\Delta\lambda/\lambda = 0.0030$ نحو أطوال موجية أطول.
أوجد سرعة المجرة على طول خط البصر $(c = 3.00 \times 10^8\ m\,s^{-1})$.

مثال محلول:

الموقف:	لتكن سرعة الصوت $340\ m\,s^{-1}$. (أ) بالقرب من معبرسكة حديد، يسمع شخص قطارًا يقترب بسرعة $20\ m\,s^{-1}$ بينما يُصدر بوقًا تردده $720\ Hz$. (i) أوجد التردد المسموع بينما يقترب القطار. (ii) أوجد التردد المسموع بينما يبتعد القطار. (ب) تُصدر سيارة تتحرك شرقًا بسرعة ثابتة صوتًا تردده $660\ Hz$، وتمر دراجة نارية تتحرك غربًا بسرعة $17\ m\,s^{-1}$ بجانبها. ويكون التردد الذي يسمعه راكب الدراجة قبل تجاوزهما $770\ Hz$. (i) أوجد سرعة السيارة. (ii) أوجد التردد بعد تجاوزهما.
التمثيل	خذ الاتجاه من المصدر إلى المُراقِب — اتجاه الانتشار — موجبًا. ثم حدِّد إشارة كل سرعة: + إذا كانت تتجه بهذا الاتجاه، – إذا كانت عكسه.
الاستراتيجية:	عوِّض بالسرعات المُشار إليها في علاقة دوبلر $f' = f_s\left(\frac{v + v_o}{v - v_s}\right)$ $(v = 340\ m\,s^{-1})$، ثم حل لإيجاد المجهول.
الحل الموضح:	(أ) القطار يُصدر $720\ Hz$، المستمع ساكن $v_o = 0$. (i) الاقتراب: $v_s = +20\ m\,s^{-1}$. $f' = \frac{340}{340+20} \times 720 = 765\ Hz$  (ii) الابتعاد: $v_s = -20\ m\,s^{-1}$. $f' = \frac{340}{340-20} \times 720 = 680\ Hz$  (ب) السيارة هي المصدر $(660\ Hz)$، والراكب هو المستمع المتحرك. (i) قبل التجاوز: $f' = 770\ Hz$، $v_o = 17\ m\,s^{-1}$، إذن سرعة السيارة $v_s = 34\ m\,s^{-1}$. (ii) بعد التجاوز: $f' = \frac{340-17}{340+v_s} \times 660 = 570\ Hz$.

كُتيِّب البيانات:

اذكر:

$c = 3.00 \times 10^8\ m\,s^{-1}$

و: $\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{v}{c}$

من الكُتيِّب؛ وتصح العلاقة فقط عندما $v \ll c$.

منطقية الحل:	يرفع الاقتراب درجة النغمة ($765 > 720$) ويخفضها الابتعاد ($720 > 680$)؛ أما في حالة السيارة، يسمع الراكب نغمةً أعلى أثناء الاقتراب ($770 > 660$) وأقل أثناء الابتعاد ($660 > 570$). وسرعة السيارة $34\ \mathrm{m\ s^{-1}}$ سريعة لكنها واقعية.
فسِّرها بنفسك:	في كلتا حالتي الجزء (أ)، يتحرك القطار بالاتجاه نفسه، ومع ذلك $v_s = +20$ في (i) و-20 في (ii). لماذا؟

حاول بنفسك: ينزاح خط هيدروجين من مجرة بعيدة نحو أطوال موجية أطول بمقدار $\Delta\lambda/\lambda = 4.0 \times 10^{-4}$. خذ $c = 3.00 \times 10^{8}\ \mathrm{m\ s^{-1}}$. **أوجد** سرعة المجرة على طول خط البصر، واذكر ما إذا كانت تقترب أم تبتعد.

حقيقة أساسية:

اختبر ذلك: يقف طالبان على جانبَي طريق متقابلين بينما تمر صفارة إنذار. توقَّع ما يسمعه كل منهما في اللحظة نفسها.

حاول:

أوجد ما يلي، بافتراض أن سرعة الصوت $340\ \mathrm{m\ s^{-1}}$.

(أ) لكل حالة، أوجد تردد الصوت الذي يسمعه المُراقِب.

(i) يقترب مصدر صوت يتحرك بسرعة $20\ \mathrm{m\ s^{-1}}$ من مُراقِب ساكن بينما يُصدر صوتًا تردده $720\ \mathrm{Hz}$.

(ii) يبتعد مصدر صوت يتحرك بسرعة $20\ \mathrm{m\ s^{-1}}$ عن مُراقِب ساكن بينما يُصدر صوتًا تردده $640\ \mathrm{Hz}$.

(iii) يقترب مُراقِب يتحرك بسرعة $34\ \mathrm{m\ s^{-1}}$ من مصدر صوت يُصدر صوتًا تردده $850\ \mathrm{Hz}$.

(iv) يبتعد مُراقِب يتحرك بسرعة $20\ \mathrm{m\ s^{-1}}$ عن مصدر صوت يُصدر صوتًا تردده $510\ \mathrm{Hz}$.

(ب) تُصدر سيارة تتحرك شرقًا بسرعة $20\ \mathrm{m\ s^{-1}}$ صوتًا تردده $720\ \mathrm{Hz}$، وتمر دراجة نارية تتحرك غربًا بسرعة $20\ \mathrm{m\ s^{-1}}$ بجانبها.

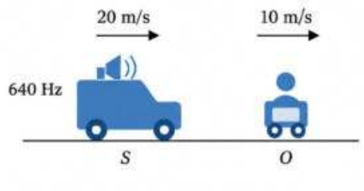
(i) أوجد تردد الصوت الذي يسمعه راكب الدراجة النارية قبل تجاوزهما، بالهرتز.

(ii) أوجد تردد الصوت بعد تجاوزهما، بالهرتز.

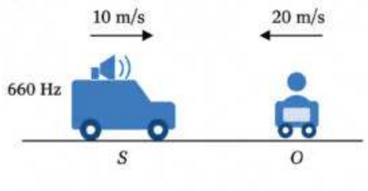
(ج) بالقرب من معبر سكة حديد، يسمع شخص صوت قطار يقترب بسرعة ثابتة بينما يُصدر بوقًا. تردد الصوت المسموع عندما يقترب القطار من المعبر $800\ \mathrm{Hz}$، وتردد الصوت المسموع عندما يبتعد القطار عن المعبر $600\ \mathrm{Hz}$. أوجد سرعة القطار، بـ $\mathrm{m\ s^{-1}}$.

(د) يتحرك مصدر الصوت S والمراقب O على خط مستقيم. حدد تردد الصوت الذي يسمعه المراقب O في كل حالة من الحالات التالية.

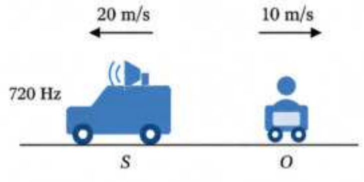
(i)



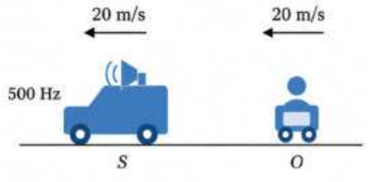
(ii)



(iii)

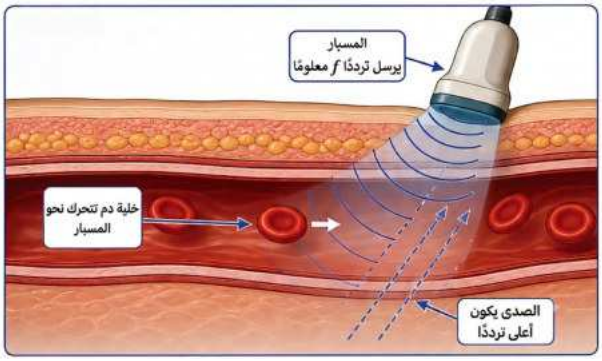


(iv)



في سياق جديد — قياس دوبلر بالموجات فوق الصوتية لتدفق الدم

في قياس دوبلر بالموجات فوق الصوتية، يُصدر مسبار موجات فوق صوتية معلومة التردد داخل وعاء دموي. وتتلقى خلايا الدم المتحركة الموجة فوق الصوتية بوصفها مُراقِبين متحركين ثم تُشتِّتها عائدة بينما تتحرك. ونتيجة لذلك، تنزاح الموجة فوق الصوتية المُشتَّتة إزاحة دوبلر. ويُستخدَم الانزياح المقاس في التردد لتحديد مركبة سرعة الدم على طول اتجاه شعاع الموجة فوق الصوتية.



يكون لصدى الموجة فوق الصوتية من دم يتحرك نحو المسبار (جهاز الفحص) (المستشعر) تردد أعلى من الموجة فوق الصوتية المُصدَّرة. فسِّر لماذا تحدث إزاحة دوبلر مرتين: مرة عندما تتلقى خلية الدم المتحركة الموجة، ومرة أخرى عندما تُشتِّت الموجة عائدة نحو المسبار (جهاز الفحص) (المستشعر).

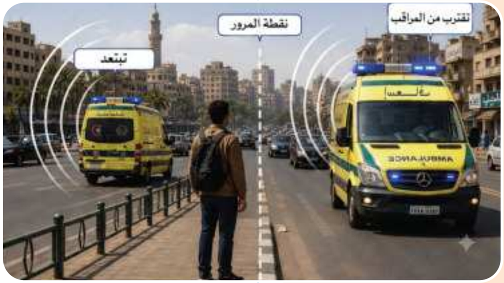
طبيعة العلم — الأدلة — إزاحة الأحمر دليلًا على تمدد الكون

ينطبق تأثير دوبلر على الضوء أيضًا. وعند مراقبة الضوء من مجرات بعيدة، غالبًا ما تنزاح الخطوط الطيفية نحو أطوال موجية أطول. وتُمكِّن مقارنة هذه الخطوط المنزاحة بالخطوط نفسها المقاسة في المعمل علماء الفلك من تحديد الحركة القطرية للمجرات. وتُعَدُّ إزاحة الأحمر الواسع الانتشار للمجرات البعيدة دليلًا على تمدد الكون.

اقترح: لماذا يأتي دليل إزاحة الأحمر من مقارنة الخطوط الطيفية المُلاحَظة بالأطوال الموجية المعملية المقابلة، بدلًا من فحص طيف المجرة وحده.

سؤال الدرس، وإجابته:

يبقى التردد الصادر لصفارة الإنذار ثابتًا. وبينما تقترب سيارة الإسعاف، تكون الأسطح الموجية أمامها أكثر تقاربًا؛ لذا يتلقى مُراقِب ساكن ترددًا أعلى ويسمع درجة نغمة أعلى. وبعد أن تمر سيارة الإسعاف وتبتعد، تكون الأسطح الموجية الواصلة إلى المُراقِب أكثر تباعدًا؛ لذا يكون التردد المُلاحَظ أقل. وتُحدَّد سرعة الصوت بواسطة الهواء؛ وتُغيِّر حركة المصدر الطول الموجي الواصل إلى المُراقِب.



سؤال للربط:

ما الذي يُنتج أطياف الانبعاث وكيف يمكن استخدامها لتحديد المسافات الفلكية؟ سيتم تناول هذا السؤال بمزيد من التفصيل في موضوعات مستويات الطاقة والنجوم.

كُتيِّب البيانات:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \approx \frac{v}{c}$$

من الكُتيِّب؛ يُعطى في الكتيب (مع $c = 3.00 \times 108 ms^{-1}$) في الامتحان، يتم اختياره من الكتيب وتعويض الإزاحة الكسرية فيه، دون حفظها. الإجابات النوعية هنا لا تحتاج إلى أي صيغة على الإطلاق.

تمرين:

أوجد ما يلي، بافتراض أن سرعة الصوت $340\ \text{m s}^{-1}$.

(أ) لكل حالة، أوجد تردد الصوت الذي يسمعه المُراقِب.

(i) يقترب مصدر صوت يتحرك بسرعة $20\ \text{m s}^{-1}$ من مُراقِب ساكن بينما يُصدر صوتًا تردده 800 Hz.

(ii) يبتعد مصدر صوت يتحرك بسرعة $20\ \text{m s}^{-1}$ عن مُراقِب ساكن بينما يُصدر صوتًا تردده 720 Hz.

(iii) يقترب مُراقِب يتحرك بسرعة $20\ \text{m s}^{-1}$ من مصدر صوت يُصدر صوتًا تردده 510 Hz.

(iv) يبتعد مُراقِب يتحرك بسرعة $34\ \text{m s}^{-1}$ عن مصدر صوت يُصدر صوتًا تردده 850 Hz.

(ب) تُصدر سيارة تتحرك شرقًا بسرعة ثابتة صوتًا تردده 576 Hz، وتمر دراجة نارية تتحرك غربًا بسرعة $10\ \text{m s}^{-1}$ بجانبها. وتردد الصوت المسموع بعد تجاوزهما 528 Hz.

(i) أوجد سرعة السيارة.

(ii) أوجد التردد قبل تجاوزهما.

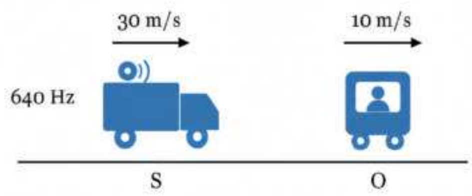
(جـ) بالقرب من معبر سكة حديد، يسمع شخص صوت قطار يقترب بسرعة ثابتة بينما يُصدر بوقًا. تردد الصوت المسموع عندما يقترب القطار من المعبر 918 Hz، وتردد الصوت المسموع عندما يبتعد القطار عن المعبر 816 Hz.

(i) أوجد سرعة القطار، بـ m s−1.

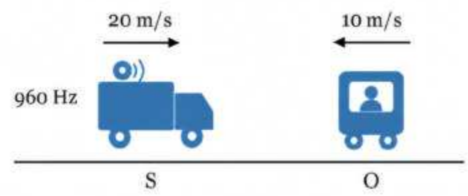
(ii) أوجد تردد البوق، بالهرتز.

(د) يتحرك مصدر الصوت S والمراقب O على خط مستقيم. حدد تردد الصوت الذي يسمعه المراقب O في كل حالة من الحالات التالية.

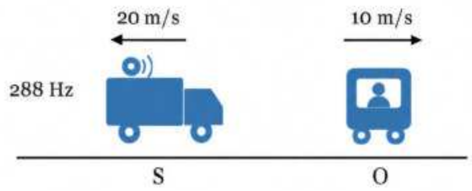
(i)



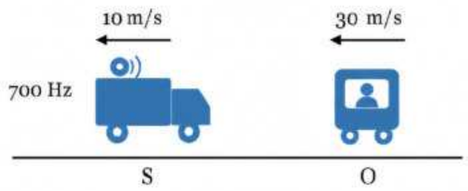
(ii)



(iii)



(iv)



سؤال بأسلوب الامتحان:

تقترب صفارة إنذار تُصدر صوتًا ثابت التردد بسرعة ثابتة من مُراقِب ساكن.

بيِّن بإيجاز لماذا يكون التردد الذي يسمعه المُراقِب أعلى من التردد المُصدَّر.

الدرس ٢-٩ — انكسار الضوء والانعكاس الكلي الداخلي

؟ سؤال الدرس:

عندما ينتقل الضوء من الماء إلى الهواء، هل يمر من خلال السطح الفاصل دائمًا، أم يمكن أن ينعكس كليًّا عائدًا إلى الماء؟

ستتعلم أن:

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تستخدم** معامل الانكسار المطلق: $n = \frac{c}{v}$ وقانون سنِل: $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ لتحديد سرعة الضوء أو طوله الموجي أو زاويته عند السطح الفاصل.

٢. **تفسر** شروط الانعكاس الكلي الداخلي عندما ينتقل الضوء من وسط ذي كثافة ضوئية أعلى إلى وسط ذي كثافة ضوئية أقل.

٣. **تحدد** الزاوية الحرجة باستخدام: $\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$، حيث $n_1 > n_2$.

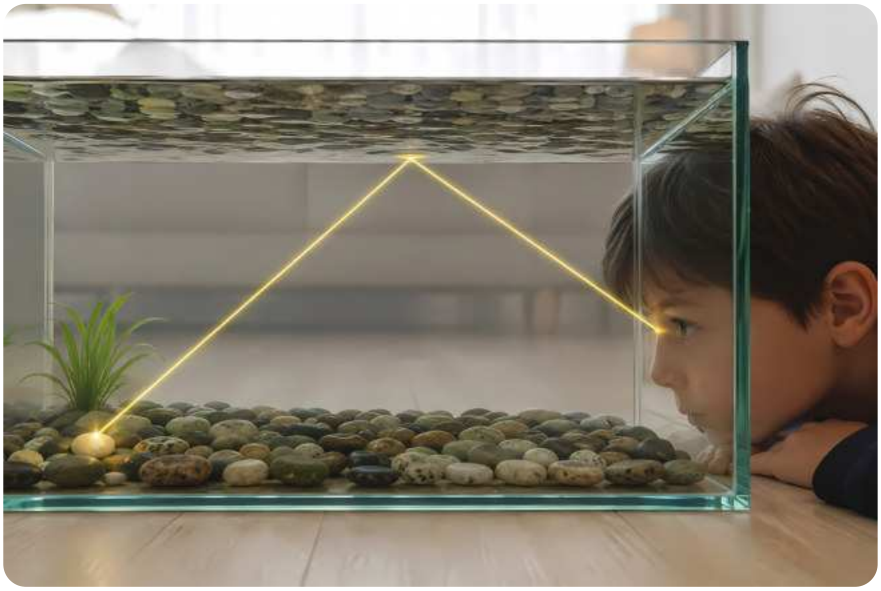
⭐ حقيقة أساسية:

عند السطح الفاصل بين وسطين شفافين، قد يُغيِّر شعاع ساقط بزاوية اتجاهه لأن سرعته تتغيَّر. وترتبط الزوايا بقانون سنِل:

$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

يظل تردد الضوء ثابتًا عند السطح الفاصل، بينما تتغير سرعته وطول موجته. تُقاس جميع الزوايا من العمودي على السطح الفاصل.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر



عندما ينتقل الضوء من الماء إلى الهواء بزاوية سقوط صغيرة، ينكسر جزء منه إلى الهواء وينعكس جزء عائدًا إلى الماء. وعند زوايا سقوط كبيرة بما يكفي، لا يخرج أي شعاع منكسر إلى الهواء؛ إذ ينعكس الضوء بأكمله عائدًا إلى الماء. وهذا هو الانعكاس الكلي الداخلي.

توقَّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) هل يمر الضوء دائمًا عبر سطح شفاف، فينحرف قليلًا لكنه يمر إلى الوسط الثاني، أم يمكن للسطح أن يُعيده بأكمله؟ وإذا كان الأمر كذلك، أي خاصية لزاوية السقوط تحدد ذلك؟

(ب) يبدأ الضوء في الماء (الأكبر كثافة ضوئية) وينتقل نحو الهواء (الأقل كثافة ضوئية). فهل سيظهر الانعكاس الكلي الداخلي لو انتقل من الهواء إلى الماء بدلاً من ذلك؟

استكشف — لاحظ الانعكاس الكلي الداخلي عند السطح الفاصل ماء-هواء

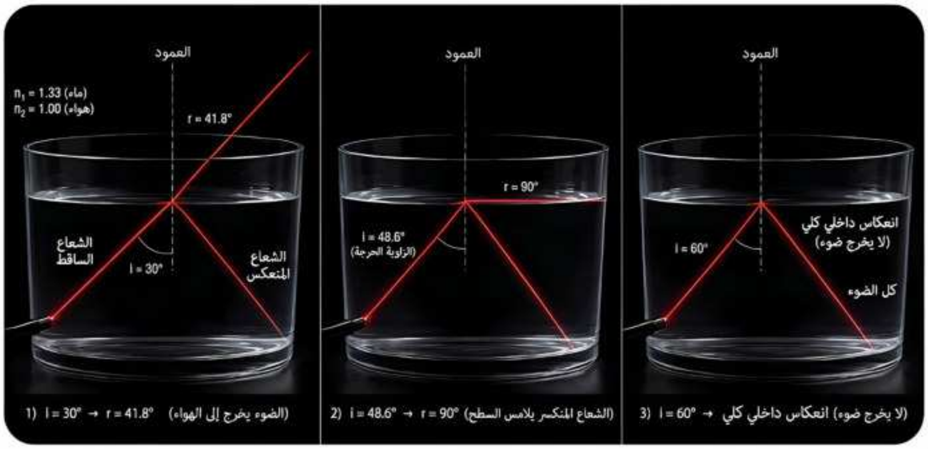
ما ستفعله: ستقوم بتغيير زاوية السقوط لحزمة (شعاع) ضوئية ضيقة تنتقل من الماء إلى الهواء، وستلاحظ الانكسار والانعكاس الجزئي والانعكاس الداخلي الكلي.

الزمن: 12 دقيقة.

ما تحتاجه:

- كوب ماء شفاف طويل.
- مصباح هاتف مُغطّى لإنتاج شعاع ضيق.
- غرفة مظلمة.
- ورقة بيضاء.

السلامة: استخدم صندوق أشعة منخفض القدرة أو مصباحًا مُغطّى. في حال استخدام الليزر، يجب أن يكون منخفض الطاقة وأن يُستخدم فقط تحت إشراف المعلم. لا توجِّه الشعاع أبدًا نحو عينَي أي شخص أو نحو سطح عاكس لامع.


العمود
$n_1 = 1.33$ (ماء)
$n_2 = 1.00$ (هواء)
r = 41.8°
الشعاع الساقط
i = 30°
الشعاع المنعكس
1) i = 30° → r = 41.8° (الضوء يخرج إلى الهواء)
العمود
r = 90°
i = 48.6° (الزاوية الحرجة)
2) i = 48.6° → r = 90° (الشعاع المنكسر يلامس السطح)
العمود
i = 60°
انعكاس داخلي كلي (لا يخرج ضوء)
كل الضوء
3) i = 60° → انعكاس داخلي كلي (لا يخرج ضوء)

الخطوات:

١ في غرفة مظلمة، وجِّه شعاعًا ضيقًا من الضوء إلى أعلى عبر جانب كوب ماء شفاف بحيث يصل إلى سطح الماء–الهواء من أسفل.

٢ ضع ورقة بيضاء فوق السطح لملاحظة أي شعاع منكسر يخرج إلى الهواء.

٣ ابدأ بزاوية سقوط صغيرة، قريبة من العمود المقام. لاحظ الشعاع المنكسر في الهواء والشعاع المنعكس في الماء.

٤ زد زاوية السقوط تدريجيًا. لاحظ أن الشعاع المنكسر يقترب من السطح وأن الشعاع المنعكس يصبح أكثر سطوعًا.

٥ استمر في زيادة الزاوية حتى يختفي الشعاع المنكسر تمامًا. وبعد هذه الزاوية، ينعكس الضوء كليًّا داخليًّا.

زاوية السقوط	الشعاع المنكسر في الهواء	الشعاع المنعكس في الماء
زاوية صغيرة		
قرب الزاوية الحرجة		
أكبر من الزاوية الحرجة		

حلّل ما جمعته:

(أ) مع زيادة زاوية السقوط، ماذا حدث للشعاع المنكسر والشعاع المنعكس؟

(ب) عندما اختفى الشعاع المنكسر، هل امتُصَّ الضوء، أم انعكس كليًّا عائدًا إلى الماء؟

اكتب تفسيرك في سطرين على الأكثر قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، لم يختفِ الشعاع الخارج تدريجيًّا. فمع زيادة زاوية السقوط، اقترب الشعاع المنكسر من السطح. وعند زاوية معيَّنة، سار على طول السطح. وعندما زادت زاوية السقوط أكثر، لم يخرج أي شعاع منكسر إلى الهواء، وانعكس الضوء عائدًا إلى الماء. وفيما يلي النموذج الذي تؤيده أدلتك. تذكَّر أولاً قانون الانكسار من الدرس 2–6، ثم أدخِل ما هو جديد: معامل الانكسار المطلق الذي يميِّز كل وسط بمفرده.

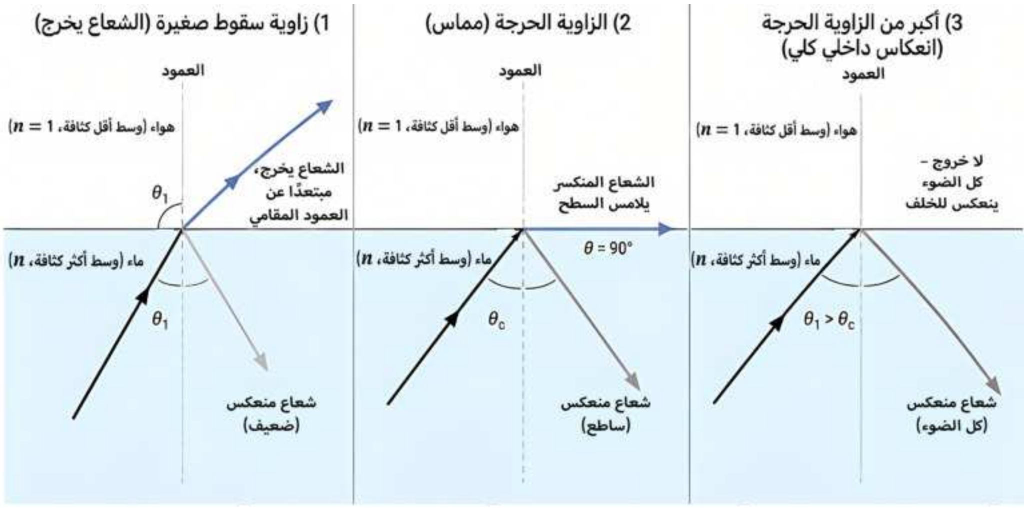
لكل وسط قيمته المميِّزة الخاصة به — معامل الانكسار المطلق

ينتقل الضوء بأقصى سرعة له في الفراغ: $c = 3.0 \times 10^8\ \mathrm{m/s}$. وفي وسط شفاف، ينتقل الضوء بسرعة أقل (v). ويُعرَّف معامل الانكسار المطلق (n) للوسط بـ: $n = \frac{c}{\mathrm{v}}$.

ويُسمى الوسط ذو معامل الانكسار الأكبر كثافة ضوئية. ويعني هذا أن الضوء ينتقل فيه بصورة أبطأ؛ ولا يعني بالضرورة أن للمادة كثافة كتلية أكبر.

وبالنسبة لضوء يمر بين وسطين: $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ حيث تُقاس θ_1 و θ_2 من العمود المقام على السطح الفاصل.

⭐ الزاوية الحرجة (θc): هي زاوية السقوط في الوسط الأكبر كثافة ضوئية التي تكون عندها زاوية انكسار الشعاع المنكسر 90°؛ ولزوايا سقوط أكبر من θc، يحدث الانعكاس الكلي الداخلي.


1) زاوية سقوط صغيرة (الشعاع يخرج)
العمود
هواء (وسط أقل كثافة، $n = 1$)
الشعاع يخرج، مبتعدًا عن العمود المقامي
θ_1
ماء (وسط أكثر كثافة، n)
θ_1
شعاع منعكس (ضعيف)
2) الزاوية الحرجة (مماس)
العمود
هواء (وسط أقل كثافة، $n = 1$)
الشعاع المنكسر يلامس السطح
$\theta = 90°$
ماء (وسط أكثر كثافة، n)
θ_c
شعاع منعكس (ساطع)
3) أكبر من الزاوية الحرجة (انعكاس داخلي كلي)
العمود
هواء (وسط أقل كثافة، $n = 1$)
لا خروج – كل الضوء ينعكس للخلف
ماء (وسط أكثر كثافة، n)
$\theta_1 > \theta_c$
شعاع منعكس (كل الضوء)

الزاوية الحرجة والانعكاس الكلي الداخلي

عندما ينتقل الضوء من وسط أكبر كثافة ضوئية (n_1) إلى وسط أقل كثافة ضوئية (n_2)، حيث $n_1 > n_2$، ينحني الشعاع المنكسر بعيدًا عن العمود المقام. والزاوية الحرجة (θ_c) هي زاوية السقوط في الوسط الأكبر كثافة ضوئية التي تكون عندها زاوية الانكسار 90°.

وباستخدام قانون سنِل: $n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90°$. وبما أن $\sin 90° = 1$، فإن: $\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$.

يحدث الانعكاس الكلي الداخلي عندما: ينتقل الضوء من وسط أكبر كثافة ضوئية إلى وسط أقل كثافة ضوئية؛ وتكون زاوية السقوط في الوسط الأكبر كثافة ضوئية أكبر من الزاوية الحرجة.

وعند زوايا أكبر من θ_c، لا يتكوَّن أي شعاع منكسر، وينعكس الضوء كليًّا عائدًا إلى الوسط الأكبر كثافة ضوئية.

نقطة

! ينتقل الضوء بأقصى سرعة له (c) في الفراغ، بينما ينتقل بسرعة أقل (v) في الوسط الشفاف. ويُعرَّف معامل الانكسار المطلق لهذا الوسط بالمعادلة $n = c/v$؛ ويُطلق على الوسط ذي معامل الانكسار الأكبر اسم "الوسط الأكثر كثافة ضوئية" — حيث ينتقل الضوء فيه ببطء أكبر، وهذا لا يعني بالضرورة أن المادة تتمتع بكثافة كتلية أعلى. وتُكتب صيغة قانون الانكسار باستخدام معاملات الانكسار المطلقة كالآتي: $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$.

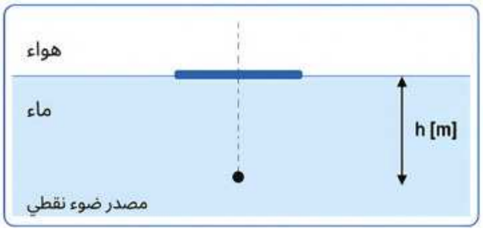
! عند انتقال الضوء من وسط أكثر كثافة ضوئية إلى وسط أقل كثافة، تُسمى زاوية السقوط التي تصبح عندها زاوية الانكسار مساوية لـ 90 درجة بـ "الزاوية الحرجة". وفي حال كانت زاوية السقوط أكبر من هذه الزاوية، فلن ينفذ أي شعاع منكسر، بل ينعكس الضوء بالكامل؛ وتُعرف هذه الظاهرة بـ "الانعكاس الكلي الداخلي".

صندوق المعادلات:

معامل الانكسار المطلق:	$n = \frac{c}{v}$
قانون سنِل للضوء:	$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$
الزاوية الحرجة (الأكبر كثافة ضوئية ← أقل كثافة ضوئية):	$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$

تطبيق سريع: يسقط ضوء على سطح ماء–هواء من جانب الماء. خذ معامل انكسار الماء $\sqrt{2}$ (وأن $\sqrt{2} = 1.4$). أوجد $\sin\theta_c$ للانعكاس الكلي الداخلي، باستخدام $\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$، ومع الهواء $n_2 = 1$.

مثال محلول:

الموقف:	(أ) ينتقل ضوء في الهواء (معامل الانكسار 1.0) ويدخل مادة معامل انكسارها 1.5. خذ سرعة الضوء في الهواء $c = 3.0 \times 10^8$ m/s والطول الموجي في الهواء $\lambda_0 = 6.0 \times 10^{-7}$ m؛ (i) أوجد السرعة v في المادة بـ m/s. (ii) أوجد الطول الموجي λ في المادة بالمتر.  (ب) يقع مصدر ضوء نقطي على عمق h m أسفل سطح الماء. يجب أن يُحجب كل شعاع قد ينكسر في الهواء بتعويم قرص على السطح، أوجد أصغر نصف قطر r m للقرص يمنع ضوء المصدر من الخروج إلى الهواء. خذ معامل انكسار الهواء = 1 والماء = n.
المعطيات والمطلوب:	(أ) $n_{air} = 1.0, n_{sub} = 1.5, c = 3.0 \times 10^8$ m/s, $\lambda_0 = 6.0 \times 10^{-7}$ m ⇐ v = ؟ λ = ؟ (ب) $n_{water} = n$, $n_{air} = 1$, h عمق ⇐ أصغر نصف قطر للقرص.

التمثيل:	عند العبور إلى وسط أكبر كثافة ضوئية، يتباطأ الضوء ويقصر طوله الموجي (يبقى التردد دون تغيير). وتحت الماء، تنكسر الأشعة التي تلتقي بالسطح بزاوية أقل من الزاوية الحرجة إلى الهواء؛ وبعدها يُنتج السطح انعكاسًا كليًّا داخليًّا.
الاستراتيجية:	استخدم قانون الانكسار بالمعاملات المطلقة: $n_{12}=\frac{n_2}{n_1}=\frac{c}{v}=\frac{\lambda_0}{\lambda}$. وللانعكاس الكلي الداخلي، أوجد الزاوية الحرجة i_0 بوضع زاوية الانكسار $90°$: $n\sin i_0=\sin 90°\Rightarrow \sin i_0=1/n$ ثم $r=h\tan i_0$.
الحل الموضح:	(أ) الضوء الداخل إلى المادة (n: 1.0 → 1.5) السرعة: $\frac{3.0\times10^8}{v}=\frac{1.5}{1.0}\Rightarrow v=2.0\times10^8\ m\,s^{-1}$ الطول الموجي: $\frac{6.0\times10^{-7}}{\lambda}=\frac{1.5}{1.0}\Rightarrow\lambda=4.0\times10^{-7}\ m$ (ب) نصف قطر القرص من الزاوية الحرجة الزاوية الحرجة: $\sin i_0=\frac{1}{n}$. من المثلث القائم: $\tan i_0=\frac{1}{\sqrt{n^2-1}}\Rightarrow r=h\tan i_0=\frac{h}{\sqrt{n^2-1}}\ m$
منطقية الحل:	يزيد نصف القطر (r) مع العمق (h) وينخفض مع زيادة (n) لأن معامل انكسار أكبر يُعطي زاوية حرجة أصغر ومخروط هروب أضيق: $r=\frac{h}{\sqrt{n^2-1}}$.
فسِّرها بنفسك:	لمصدر عند العمق h نفسه، لماذا يجعل معامل انكسار n أكبر قرص الحجب أصغر؟

حاول بنفسك: يقع مصباح على عمق $h = 0.30\ m$ تحت ماء معامل انكساره $\sqrt{2}$.

أوجد أصغر نصف قطر قرص r يحجب كل شعاع خارج، بالمتر.

اختبر ذلك: في كوبك، وجِّه الشعاع الضيق لأسفل من الهواء إلى الماء بزاوية سقوط كبيرة، وأظهر أنه لا يزال هناك شعاع منتقل إلى الماء - على عكس الشعاع الصاعد من الماء إلى الهواء.

نصائح امتحانية:

اعرض العلاقة التي استخدمتها

$n=\frac{c}{v}$، أو $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_1}=\frac{n_2}{n_1}$، أو $\sin\theta_c=\frac{n_2}{n_1}$

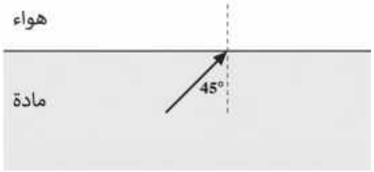
والتعويض الذي يليها في كل إجابة؛ يمنح المتحنون درجات على طريقة الحل.

سؤال للربط:

كيف يُستخدَم الانعكاس الكلي الداخلي لتوجيه الضوء في الألياف الضوئية؟

حاول:

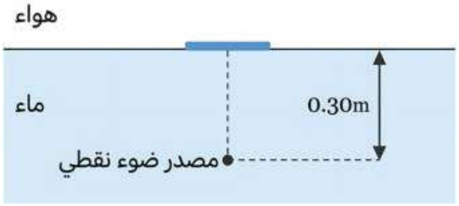
(أ) كما في الشكل على اليسار، ينتقل ضوء في مادة معامل انكسارها $\sqrt{2}$ ويدخل الهواء الذي معامل انكساره 1.0 بزاوية سقوط $45°$. ولتكن سرعة الضوء في الهواء c تساوي $3.0\times10^8\ m/s$، وليكن الطول الموجي للضوء في الهواء λ_0 يساوي $5.8\times10^{-7}\ m$، وليكن $\sqrt{2}=1.4$.



(i) أوجد سرعة الضوء v في المادة، بـ m/s.

(ii) أوجد الطول الموجي للضوء λ في المادة، بالمتر.

(iii) لتكن زاوية الانكسار r. أوجد قيمة sin r.

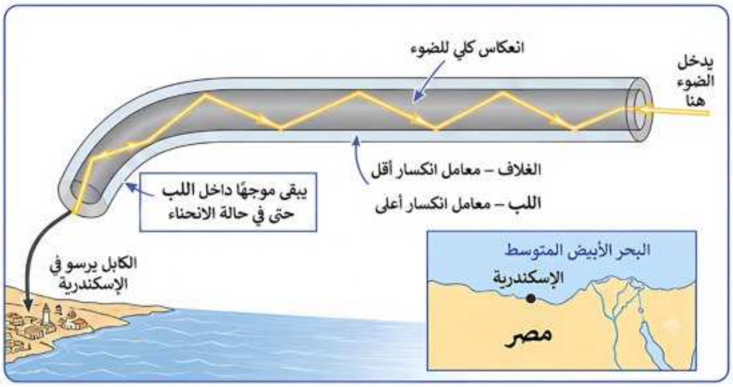


(ب) يوجد مصدر ضوء نقطي على عمق 0.30 m أسفل سطح الماء. لمنع ضوء المصدر النقطي من الخروج إلى الهواء بتعويم قرص على سطح الماء، أوجد أصغر نصف قطر r للقرص بالمتر.

افترض أن معامل انكسار الهواء 1 وأن معامل انكسار الماء $\sqrt{2}$.

في سياق جديد — الألياف الضوئية التي تصل إلى الإسكندرية

يحتوي الليف الضوئي على غلاف داخلي معامل انكساره أكبر من الغلاف المحيط به. يمكن للضوء الموجه المتنقل في الغلاف الداخلي أن يصل إلى السطح الفاصل بين الغلاف الداخلي والغلاف الخارجي الضوء الموجَّه المتحرك في اللُبِّ بحد اللُبِّ-الغلاف بزوايا أكبر من الزاوية الحرجة، فيخضع لانعكاس كلي داخلي ويبقى موجَّهًا على طول الليف.

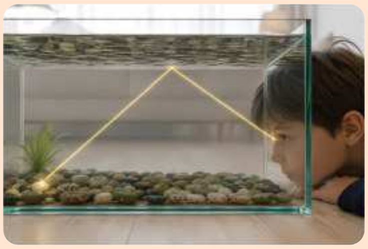

انعكاس كلي للضوء
يدخل الضوء هنا
الغلاف – معامل انكسار أقل
اللب – معامل انكسار أعلى
يبقى موجهًا داخل اللب حتى في حالة الانحناء
الكابل يرسو في الإسكندرية
البحر الأبيض المتوسط
الإسكندرية
مصر

⇦ معامل انكسار الغلاف أقل من اللُبِّ؛ لذا يمكن أن ينعكس الضوء الملتقي بحدهما كليًّا. فسِّر لماذا يبقى الضوء محبوسًا في اللُبّ، واذكر ماذا سيحدث للإشارة لو صُنع الغلاف بدلًا من ذلك من زجاج معامل انكساره أعلى من اللُبِّ.

طبيعة العلم: العلم مسعى مشترك — تشارلز كاو وأنقى زجاج

يمكن للانعكاس الكلي الداخلي أن يوجِّه الضوء على طول ليف زجاجي، لكن الزجاج قديمًا كان يمتصُّ ضوءًا كثيرًا جدًّا للاتصالات بعيدة المدى. وفي عام ١٩٦٦، أثبت تشارلز كاو أن السبب الرئيسي للفقد كان الشوائب في الزجاج. فسر أن الزجاج النقي بما يكفي يمكنه نقل الضوء عبر مسافات طويلة. وجعلت التحسينات اللاحقة في تصنيع الزجاج اتصالات الألياف الضوئية عملية، وشارك كاو في جائزة نوبل في الفيزياء لعام ٢٠٠٩ عن هذا العمل. وأصبحت الألياف الضوئية تقنية رئيسية للاتصالات العالمية.

⇦ **دورك الآن:** اقترح سببًا واحدًا يجعل رؤية كاو لم تُغيِّر العالم إلا بعد أن تمكن علماء ومهندسون آخرون، في بلدان عديدة، من اختبار حسابه والبناء عليه.



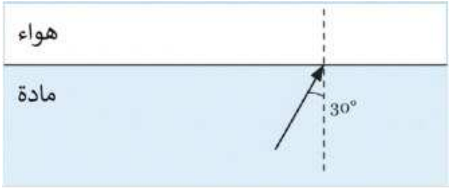
سؤال الدرس، وإجابته:

عندما يسقط الضوء من الماء إلى الهواء، هل يعبر السطح دائمًا، أم يمكن أن يعكس السطح الضوء كليًّا؟ لا يعبر دائمًا. فمن الجانب الأكبر كثافة ضوئية إلى الأقل كثافة ضوئية، ينحني الشعاع بعيدًا عن العمود المقام.

ومع انحناء الشعاع الخارج أكثر عن العمود المقام حتى يلامس السطح مماسيًّا، عندما يكون الشعاع الساقط بالزاوية الحرجة $\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$. وبعد تلك الزاوية لا يوجد أي شعاع منكسر على الإطلاق: إذ ينعكس الضوء بأكمله عائدًا للماء، ويصبح السطح مرآة مثالية. فوق الزاوية الحرجة، يتوقف السطح الفاصل من الأكبر كثافة ضوئية إلى الأقل كثافة ضوئية عن النفاذ ويعكس الضوء كليًّا — وهذا هو المبدأ الذي يوجِّه إشارات الضوء على طول الألياف الضوئية.

تمرين:

(أ) كما في الشكل على اليسار، ينتقل ضوء في مادة معامل انكسارها 1.5 ويدخل الهواء الذي معامل انكساره 1.0 بزاوية سقوط $30°$. ولتكن سرعة الضوء في الهواء c تساوي 3.0×10^8 m/s، وليكن الطول الموجي للضوء في المادة λ يساوي 4.0×10^{-7} m.

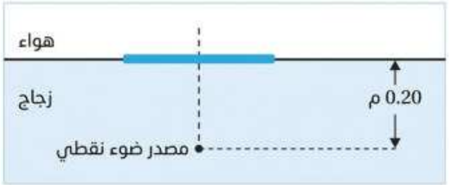


(i) أوجد سرعة الضوء v في المادة، بـ m/s.

(ii) أوجد الطول الموجي λ_0 للضوء في الهواء، بالمتر.

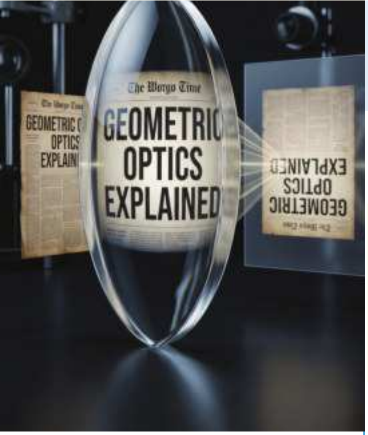
(iii) لتكن زاوية الانكسار r. أوجد قيمة $\sin r$.

(ب) يوجد مصدر ضوء نقطي على بُعد 0.20 m من سطح الزجاج. لمنع ضوء المصدر النقطي من الخروج إلى الهواء بوضع قرص على السطح، أوجد أصغر نصف قطر r للقرص بالمتر. افترض أن معامل انكسار الهواء 1.0 وأن معامل انكسار الزجاج $\sqrt{5}$.



سؤال بأسلوب الامتحان:

يصل ضوء داخل قطعة زجاج معامل انكسارها 1.5 إلى سطح الزجاج – الهواء (معامل انكسار الهواء 1.0). أوجد $\sin \theta c$ للانعكاس الكلي الداخلي عند هذا السطح، واذكر ماذا يحدث لشعاع يلتقي بالسطح بزاوية سقوط أكبر من θ_c.


The Wongo Time
GEOMETRIC OPTICS EXPLAINED
GEOMETRIC OPTICS EXPLAINED

الدرس ٢-١٠ — العدسات والصور

؟ سؤال الدرس:

تُنتج عدسة مكبِّرة صورة معتدلة ومكبَّرة عندما تكون قريبة من صحيفة. لماذا يمكن أن تصبح الصورة مقلوبة عندما تُبعَد العدسة أكثر عن الصفحة؟

ستتعلم أن:

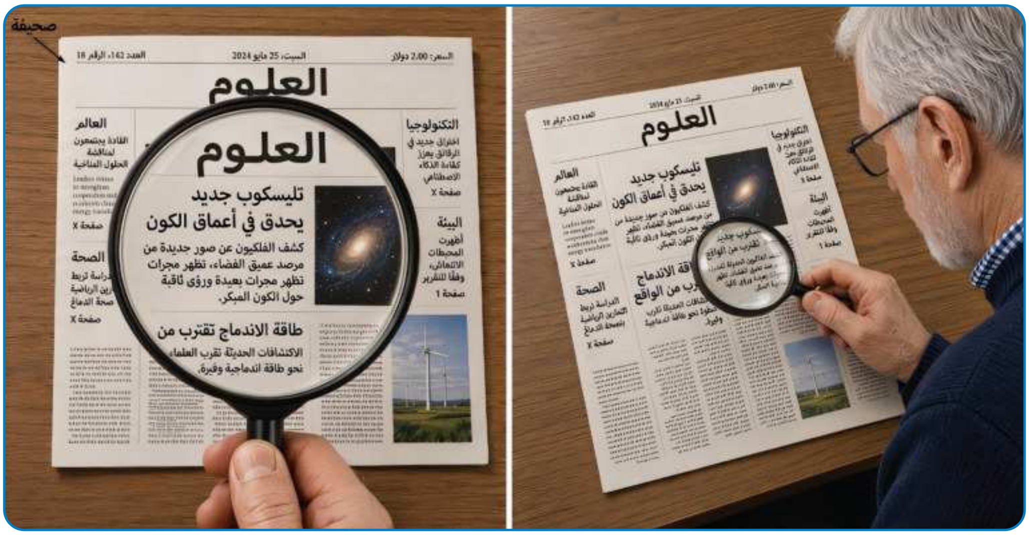
بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. ترسم الأشعة الرئيسية عبر عدسة رقيقة وتحدد الصورة من تقاطعها.

٢. تصف الصورة المتكوِّنة بواسطة عدسة بأنها حقيقية أو تقديرية، مقلوبة أو معتدلة، مكبَّرة أو مصغَّرة.

٣. تستخدم معادلة العدسة وعلاقة التكبير لتحديد موضع الصورة وحجمها، باستخدام اصطلاح الإشارة المذكور في الدرس.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر


صحيفة
العلوم
تليسكوب جديد يحدق في أعماق الكون
كشف الفلكيون عن صور جديدة من مرصد عميق الفضاء، تظهر مجرات بعيدة ورؤى ثاقبة حول الكون المبكر.
طاقة الاندماج تقترب من الواقع
التكنولوجيا
العالم
البيئة
الصحة

يُمسك جدٌّ بعدسة مكبِّرة قريبة فوق صحيفة، فيبدو العنوان كبيرًا ومعتدلاً. ويرفع العدسة نفسها أعلى فوق الصفحة، فتصبح الحروف أصغر ومقلوبة. نفس العدسة تُستخدَم في الحالتين، فقط تغيَّرت المسافة بين الصفحة والعدسة. لماذا يُغيِّر تغيير هذه المسافة الصورة من معتدلة ومكبَّرة إلى مقلوبة؟

حقيقة أساسية:

ينكسر الضوء عندما يمر من وسط إلى آخر بمعامل انكسار مختلف. وتستخدم العدسة الانكسار عند سطحيها المنحنيين لتغيير اتجاهات أشعة الضوء وتكوين صورة.

توقَّع قبل أن تستمر :

(أ) هل تجعل العدسة المكبِّرة الأجسام تبدو دائمًا أكبر، أيًا كانت المسافة؟

(ب) إذا غطيت نصف العدسة بإبهامك، هل تفقد نصف الصورة؟

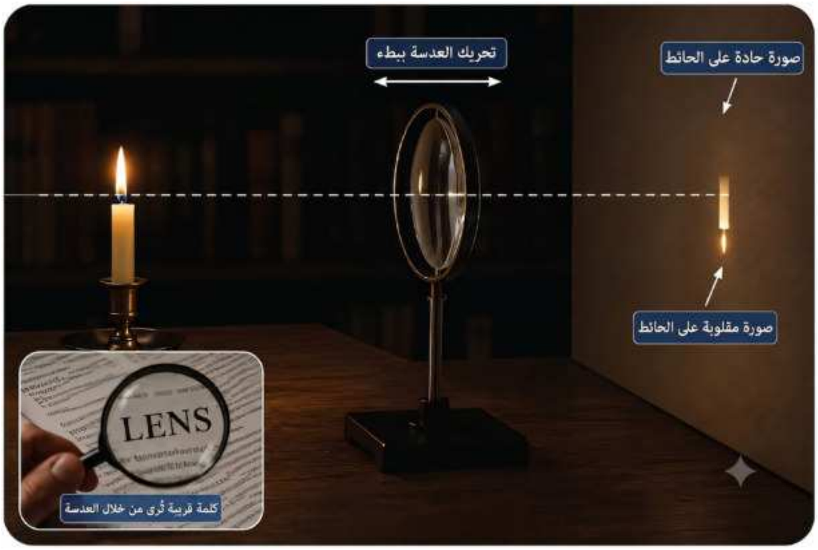
استكشف — كوِّن صورة حقيقية بعدسة محدبة

ما ستفعله: تستخدم عدسة محدبة لتكوين صورة حقيقية على شاشة وتقارنها بالصورة التقديرية المُلاحَظة عندما يكون الجسم داخل البُعد البؤري.

الزمن: 12 دقيقة.

ما تحتاجه:

- عدسة محدبة أو عدسة مكبِّرة.
- جسم صغير ساطع، كلهب شمعة.
- شاشة بيضاء أو جدار عادي.
- غرفة مظلمة.



الخطوات:

١ ضع جسمًا صغيرًا ساطعًا على بُعد عدة أمتار من جدار أو شاشة بيضاء.

٢ أمسك العدسة المحدبة بين الجسم والشاشة.

٣ حرِّك العدسة ببطء حتى تتكوَّن صورة واضحة على الشاشة.

٤ سجِّل ما إذا كانت الصورة معتدلة أم مقلوبة.

٥ ضع العدسة نفسها قريبة من كلمة مطبوعة وانظر عبر العدسة.

٦ حرِّك العدسة ببطء بعيدًا عن الكلمة ولاحظ كيف تتغيَّر الصورة.

ملاحظة القياس: حرِّك العدسة ببطء بالقرب من موضع التركيز الحاد؛ ستصبح الصورة على الجدار مشوشة بسرعة إذا اختلفت المسافة ولو ببضعة ملليمترات.

موضع الجسم بالنسبة للعدسة	هل تكوَّنت صورة على الشاشة؟	اتجاه الصورة

حلِّل ما جمعته:

(أ) هل كانت الصورة المتكوِّنة على الجدار حقيقية أم تقديرية؟ كيف تعرف ذلك؟

(ب) عندما كانت الكلمة المطبوعة قريبة جدًّا من العدسة، لماذا لم يكن بالإمكان تكوين صورتها على شاشة؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، التقطت صورة واضحة للمصدر البعيد على الجدار، وكانت مقلوبة. ولم يكن بالإمكان تكوين صورة الكلمة القريبة المرئية عبر العدسة على أي شاشة. ولعلك توقعت أن العدسة تُكبِّر فقط؛ لكن صورتيك مختلفتان بالفعل. وفيما يلي النموذج الذي تشير إليه الأشعة — مرسومًا، دون حساب بعد.

شكلان للعدسات، محور رئيسي واحد:

العدسة المحدبة أكثر سمكًا عند مركزها منها عند حوافها، وتعمل كعدسة مجمِّعة للأشعة المتوازية. والعدسة المقعرة أرق عند مركزها منها عند حوافها، وتعمل كعدسة مفرِّقة للأشعة المتوازية. والمحور الرئيسي هو الخط المستقيم المار بالمركز البصري للعدسة والعمودي على مستوى العدسة. وتقع البؤرتان الرئيسيتان F و′F على هذا المحور، واحدة على كل جانب من العدسة، على بُعد f، يُسمى البُعد البؤري، من المركز البصري. وتُجمِّع العدسة المحدبة الأشعة المتوازية نحو ′F؛ وتُفرِّقها العدسة المقعرة.

ولتحديد الصورة المتكوِّنة بواسطة عدسة رقيقة، ارسم شعاعين من الأشعة الرئيسية التالية من أعلى الجسم:

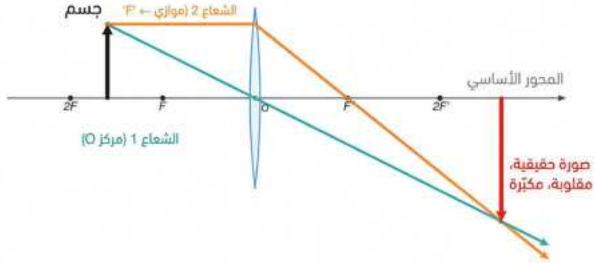
١. شعاع يمر بالمركز البصري للعدسة يستمر دون انحراف.

٢. شعاع موازٍ للمحور الرئيسي ينكسر عبر البؤرة البعيدة ′F لعدسة محدبة أو يبدو قادمًا من البؤرة القريبة F لعدسة مقعرة.

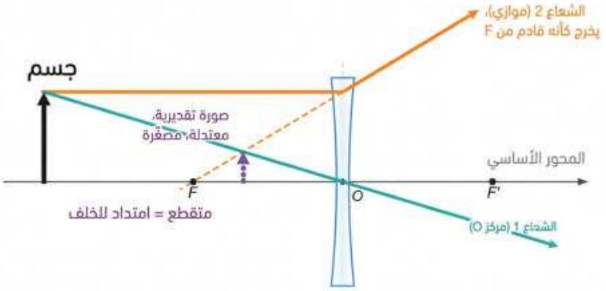
٣. شعاع يمر بالبؤرة القريبة F لعدسة محدبة يخرج موازيًا للمحور الرئيسي. أما بالنسبة لعدسة مقعرة، فإن شعاعًا موجَّهًا نحو البؤرة البعيدة ′F يخرج موازيًا للمحور الرئيسي.

إذا التقت الأشعة المنكسرة فعليًّا، تكون الصورة حقيقية ويمكن تكوينها على شاشة. وإذا تفرقت الأشعة المنكسرة والتقت امتداداتها الخلفية فقط، تكون الصورة تقديرية ولا يمكن تكوينها على شاشة.

1. عدسة مجمعة (محدبة) - صورة حقيقية


جسم
الشعاع 2 (موازي) ← ′F
المحور الأساسي
2F
F
O
′F
′2F
الشعاع 1 (مركز O)
صورة حقيقية،
مقلوبة، مكبّرة

2. عدسة مفرقة (مقعرة) - صورة تقديرية


الشعاع 2 (موازي)،
يخرج كأنه قادم من F
جسم
صورة تقديرية،
معتدلة، مصغّرة
المحور الأساسي
F
O
′F
متقطع = امتداد للخلف
الشعاع 1 (مركز O)

⭐ البؤرة الرئيسية (F):

بالنسبة لعدسة محدبة، البؤرة الرئيسية هي النقطة على المحور الرئيسي التي تتجمع عندها الأشعة الموازية للمحور الرئيسي بعد الانكسار.

بالنسبة للعدسة المقعرة، فهي النقطة التي تبدو منها هذه الأشعة وكأنها تتباعد.

والبُعد البؤري *f* هو المسافة من المركز البصري إلى البؤرة الرئيسية.

المواضع الستة، ملخصة في جدول واحد:

حرِّك الجسم من بعيد جدًّا، وتُنتج العدسة المحدبة تسلسلًا ثابتًا من الصور. أما بالنسبة لعدسة مقعرة، فتبقى الصورة تقديرية ومعتدلة ومصغَّرة، رغم أن موضعها وحجمها يتغيَّران مع تحرك الجسم. اعتبر كل صف كحالة من حالات مخطط الأشعة - يأتي الجبر في الصفحة التالية.

موضع الصورة	طبيعة الصورة	الاتجاه والحجم	موضع الجسم
عند شاشة خلف العدسة	حقيقية	مقلوبة • مصغَّرة	أبعد كثيرًا من 2F
عند شاشة خلف العدسة	حقيقية	مقلوبة • بالحجم نفسه	عند 2F
عند شاشة خلف العدسة	حقيقية	مقلوبة • مكبَّرة	بين F و2F
—	الصورة عند اللانهاية؛ الأشعة الخارجة موازية	—	عند F
أمام العدسة، من جانب الجسم	تقديرية	معتدلة • مكبَّرة	داخل F (أقرب من F)
أمام العدسة، من جانب الجسم	تقديرية	معتدلة • مصغَّرة	عدسة مقعرة — أي موضع

من الرسم إلى الحساب — معادلة العدسة:

تُظهر الأشعة أين تقع الصورة؛ والآن نحددها كميًّا. لتكن a المسافة من الجسم إلى العدسة، وb المسافة من الصورة إلى العدسة، وf البُعد البؤري. وفي هذا الدرس، نستخدم اصطلاح الإشارة التالي: a موجبة دائمًا، وf تُكتب كمقدار موجب، وتُحدِّد إشارة b نوع الصورة.

بالنسبة للعدسة المحدبة (المجمِّعة): $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$

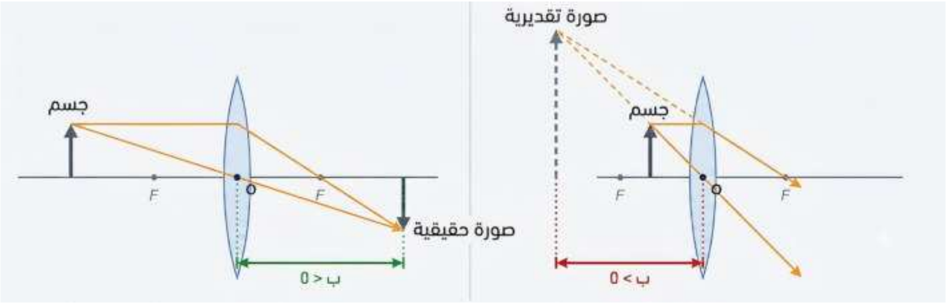
بالنسبة للعدسة المقعرة (المفرِّقة): $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = -\frac{1}{f}$

التكبير M هو نسبة حجم الصورة إلى حجم الجسم: $M = \left|\frac{b}{a}\right|$. وفي هذا الاصطلاح، يُؤخَذ M كنسبة حجم موجبة. ويُوصَف اتجاه الصورة بصورة منفصلة بأنه معتدل أو مقلوب.

الإشارة الحاسمة — إشارة b:

مسافة الصورة b هي الكمية الوحيدة ذات الإشارة. وتُخبرك إشارتها، دون رسم إضافي، بأي جانب تقع الصورة — وبالتالي ما إذا كانت حقيقية أم تقديرية.

إشارة b	أين تقع الصورة	ما هي
b موجبة (+)	خلف العدسة — الجانب البعيد، المقابل للجسم	صورة حقيقية
b سالبة (-)	أمام العدسة — الجانب نفسه للجسم	صورة تقديرية



نصيحة امتحانية:

اذكر b بإشارتها، ثم اقرأ نوع الصورة مباشرة منها: فالموجب يعني حقيقية وخلف العدسة، والسالب يعني تقديرية وأمام العدسة. لا تكتب أبدًا إشارة على M.

نقطة

! تُسمى العدسة التي تكون أكثر سُمكاً عند المركز مقارنةً بالأطراف "عدسة محدبة"، وهي تعمل على تجميع الأشعة المتوازية؛ أما العدسة التي تكون أقل سُمكاً عند المركز مقارنةً بالأطراف فتُسمى "عدسة مقعرة"، وتعمل على تفريق تلك الأشعة. ويُعرف الخط المستقيم المار بالمركز البصري والعمودي على العدسة باسم "المحور الرئيسي".

! تُسمى الصورة التي تتكون عند نقطة تقاطع الأشعة الضوئية نفسها "صورة حقيقية"؛ بينما تُسمى الصورة التي تتكون عند امتدادات الأشعة المتباعدة "صورة تقديرية" (أو تخيلية). ففي حالة العدسة المحدبة، إذا وُضع الجسم خارج البؤرة، تكون الصورة حقيقية ومقلوبة؛ أما إذا وُضع الجسم داخل البؤرة، فتكون الصورة تقديرية ومعتدلة. وفي حالة العدسة المقعرة، تكون الصورة دائماً تقديرية ومعتدلة ومصغرة، بغض النظر عن موقع الجسم.

! ليكن a هو بُعد الجسم، و b هو بُعد الصورة، و f هو البعد البؤري. للعدسة المحدبة: $\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{a}$ وللعدسة المقعرة: $-\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{a}$ وتُحسب قيمة التكبير (M) بالعلاقة: $M = \left|\frac{b}{a}\right|$.

صندوق المعادلات:

العدسة المحدبة	$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$
العدسة المقعرة	$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = -\frac{1}{f}$
التكبير	$M = \left\|\frac{b}{a}\right\|$

تطبيق سريع:

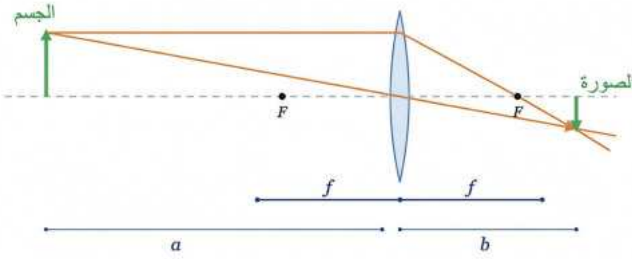
يوضع جسم على بُعد 40 cm أمام عدسة محدبة بُعدها البؤري 10 cm. احسب مسافة الصورة b من $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = -\frac{1}{f}$، ثم التكبير M.

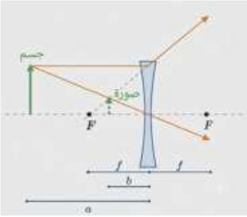
مثال محلول:

الموقف:	يوضع جسم أمام عدسة رقيقة. تُدرس حالتان منفصلتان: عدسة محدبة (مجمِّعة) وعدسة مقعرة (مفرِّقة).
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** (أ) عدسة محدبة: f = 20 cm ، a = 60 cm. (ب) عدسة مقعرة: f = 10 cm ، a = 20 cm. **المطلوب: (لأقرب رقمين معنويين):** (i) نوع الصورة (ii) موضع الصورة (iii) التكبير.
التمثيل:	استخدم معادلة العدسة الرقيقة، حيث تُمثّل a مسافة الجسم و b مسافة الصورة: استخدم 1/f موجبة للعدسة المحدبة (المجمعة) و 1/f سالبة للعدسة المقعرة (المفرقة)، مع اعتبار f دائماً قيمة موجبة. • تشير القيمة الموجبة لـ b إلى صورة حقيقية تقع في الجهة المقابلة للعدسة، بينما تشير القيمة السالبة لـ b إلى صورة تقديرية تقع في نفس جهة الجسم. • يُرمز للتكبير الخطي بالرمز M. يتم تحديد موقع كل صورة باستخدام شعاعين رئيسيين: أحدهما موازٍ للمحور، والآخر يمر عبر المركز البصري للعدسة.

حقيقة أساسية:

لا يمكن تكوين صورة تقديرية (b سالبة) على شاشة — إذ يبدو أن الأشعة تصدر منها فقط. والكلمة المعتدلة المرئية عبر عدسة مكبِّرة هي تماماً من هذا النوع من الصور.

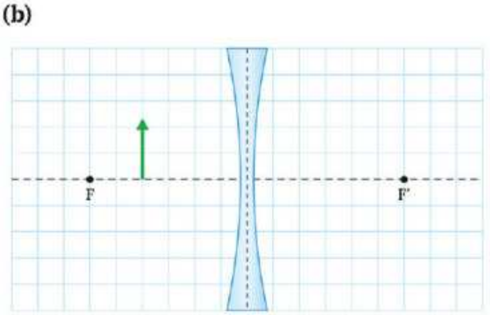
الاستراتيجية:	**١.** حدِّد إشارة حد العدسة: $+\frac{1}{f}$ للمحدبة، $-\frac{1}{f}$ للمقعرة. **٢.** حل معادلة العدسة لإيجاد b، يمثل b الموجب صورة حقيقية على الجانب البعيد من العدسة؛ ويمثل b السالب صورة تقديرية على نفس جانب الجسم. **٣.** أوجد $M = \left\lvert\frac{b}{a}\right\rvert$. **٤.** تحقق بمخطط أشعة، يتم تحديد موقع كل صورة باستخدام شعاعين رئيسيين: أحدهما موازٍ للمحور والآخر يمر عبر المركز البصري للعدسة.
الحل الموضح:	(أ) **العدسة المحدبة:** الجسم (60 cm) أبعد من 2f = 40 cm، لذا الصورة حقيقية ومقلوبة ومصغَّرة. $b = 30cm \Longleftarrow \frac{1}{60} + \frac{1}{b} = \frac{1}{20}$ (خلف العدسة). $M = \frac{30}{60} = 0.50$.  (ب) العدسة المقعرة: الصورة دائمًا تقديرية ومعتدلة ومصغَّرة. $b = 6.7cm \Longleftarrow \frac{1}{20} + \frac{1}{b} = \frac{1}{10}$ (أمام العدسة). $M = \frac{6.7}{20} \approx 0.33$.
منطقية الحل:	جسم أبعد من 2f يُعطي صورة حقيقية بين f و2f؛ وb = 30 cm تقع بين 20 و40 cm. وتُعطي العدسة المقعرة دائمًا صورة تقديرية معتدلة مصغَّرة، و $\lvert b\rvert = 6.7\text{ cm} < \lvert f\rvert = 10\text{ cm}$.
فسِّرها بنفسك:	لماذا تُكوِّن عدسة مفرِّقة (مقعرة) دائمًا صورة تقديرية ومعتدلة ومصغَّرة، أيًّا كانت مسافة الجسم؟

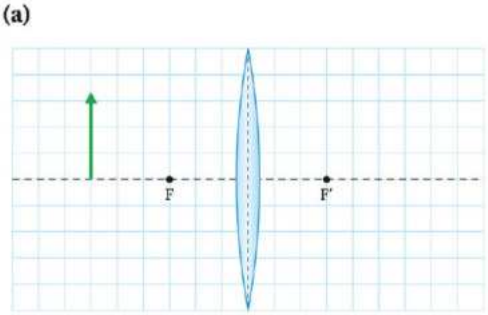


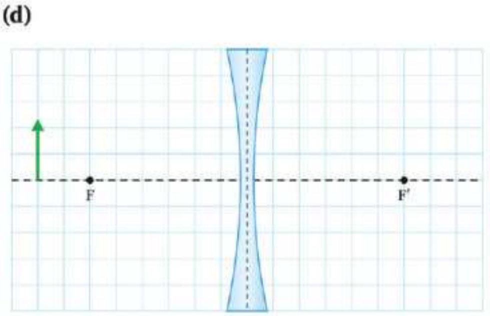
جرِّب بنفسك: التقط صورة واضحة على الجدار. ثم مرِّر بطاقة فوق نصف العدسة. لاحظ ما الذي يتغيَّر: شكل الصورة، أم سطوعها فقط؟

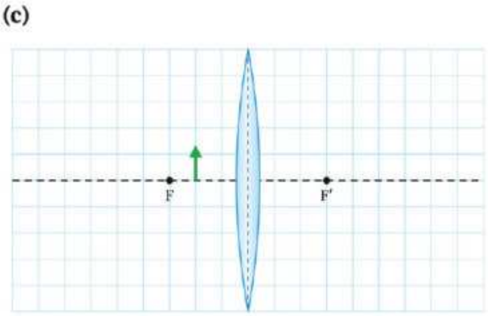
جرِّب:

١. بفرض أن الجسم يُمثَّل بسهم وأن العدسة ببؤرتين F وF'، ارسم صورة الجسم المتكوِّنة بواسطة العدسة.









٢. **أوجد ما يلي لأقرب رقمين عشريين:**

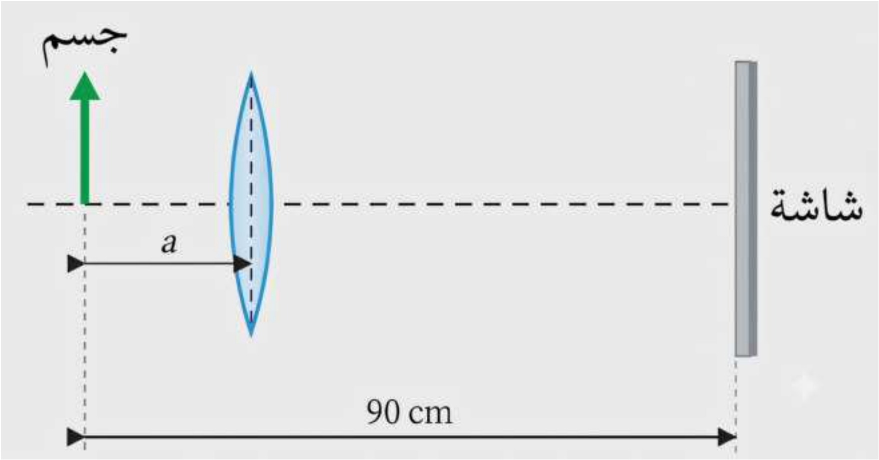
(أ) لكل حالة، أوجد (A) نوع الصورة، (B) موضع الصورة، (C) التكبير.

(i) يوضع جسم على بُعد 30 cm أمام عدسة محدبة بُعدها البؤري 20 cm.

(ii) يوضع جسم على بُعد 4.0 cm أمام عدسة محدبة بُعدها البؤري 6.0 cm.

(iii) يوضع جسم على بُعد 6.0 cm أمام عدسة مقعرة بُعدها البؤري 12 cm.

(ب) كما في الشكل، وضعت شاشة على بُعد 90 cm من جسم، وتُحرَّك عدسة محدبة بُعدها البؤري 20 cm بين الجسم والشاشة. أوجد جميع قيم المسافة a بين العدسة والجسم التي تتكوَّن عندها صورة واضحة على الشاشة.



ملاحظة عملية:

في حالات الصورة الخيالية، تتفرق الأشعة الخارجة؛ مدِّدها إلى الخلف كخطوط متقطعة لإيجاد موضع الصورة التقديرية، أمام العدسة على جانب الجسم.

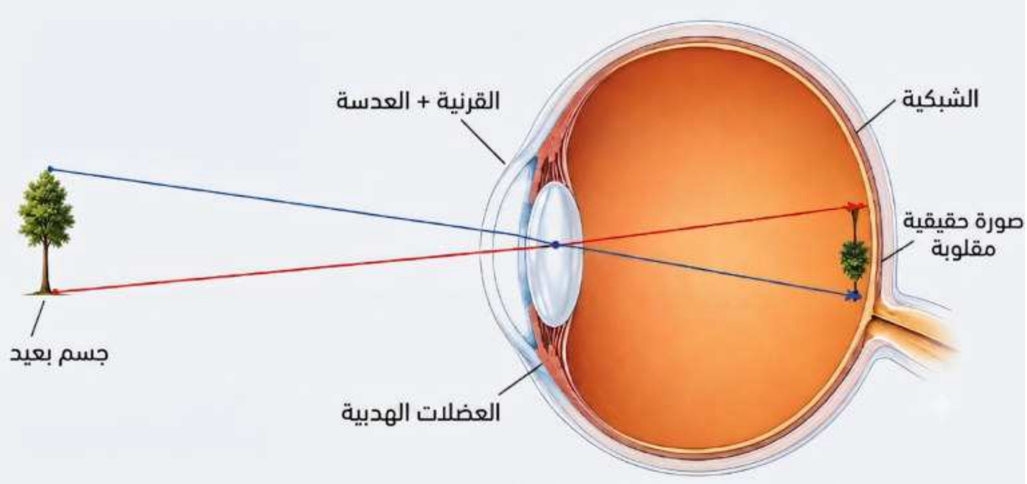
سؤال للربط:

كيف يسمح الانكسار عند سطح منحنٍ لعدسة واحدة بتكوين صورة؟

– يرتبط هذا بموضوع الانكسار في الدرس 9-2. الانحناء الذي تعرفت عليه هناك هو ما يخضع له كل شعاع رئيسي عند العدسة.

في سياق جديد — العدسة داخل عينك

تعمل القرنية والعدسة البلورية للعين معًا كنظام بصري مجمِّع. ويُكوِّنان صورة حقيقية ومقلوبة على الشبكية. ويُغيِّر التكيُّف شكل العدسة البلورية، فيُعدِّل البُعد البؤري الفعلي بحيث يمكن تركيز صور الأجسام القريبة والبعيدة على الشبكية.



طبِّق فهمك: فسِّر لماذا تكون الصورة على الشبكية حقيقية ومقلوبة، وأي الأشعة الرئيسية سترسمها لتوضيح ذلك..

طبيعة العلم — ابن الهيثم وكتاب المناظر — الرؤية بالضوء الداخل إلى العين

توصل ابن الهيثم بأن الرؤية تحدث لأن الضوء من الأجسام يدخل العين، لا لأن أشعة تخرج من العين. وأكَّد عمله في البصريات على الملاحظة والتجربة، وهما منهجان محوريان في العلم الحديث.

(المصدر: ابن الهيثم، كتاب المناظر، نحو ١٠١١–١٠٢١ م.)

دورك الآن: اقترح ملاحظة يومية واحدة تُظهر أننا نرى بالضوء الداخل إلى العين، لا بأشعة تخرج منها.

سؤال الدرس، وإجابته:

تُكبِّر عدسة مكبِّرة النص عندما تُمسَك قريبة من صحيفة، لكن لماذا تصبح الحروف مقلوبة عندما تُبعَد العدسة أكثر؟ عندما تكون الصحيفة بين العدسة المحدبة وبؤرتها الرئيسية، تُكوِّن العدسة صورة تقديرية ومعتدلة ومكبَّرة. ومع إبعاد العدسة، تزداد مسافة الجسم. وبمجرد أن تصبح الصحيفة أبعد من البؤرة الرئيسية، تُكوِّن العدسة صورة حقيقية ومقلوبة؛ لذا، تعتمد خصائص الصورة على موضع الجسم بالنسبة للبؤرة الرئيسية: فالجسم الموضوع بين العدسة والبؤرة الرئيسية يُنتج صورة تقديرية ومعتدلة، بينما يُنتج الجسم الموضوع أبعد من البؤرة الرئيسية صورة حقيقية ومقلوبة.

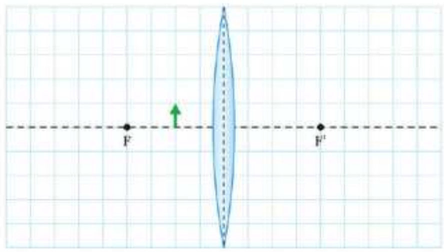
العلوم
تليسكوب جديد يحدق في أعماق الكون

مسافة الصورة b، بإشارتها، واذكر ما إذا كانت الصورة حقيقية أم تقديرية.

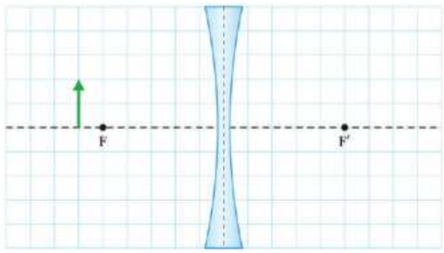
تمرين:

١. بفرض أن الجسم يُمثَّل بسهم وأن العدسة ببؤرتين F وF’ ، ارسم صورة الجسم المتكوِّنة بواسطة العدسة.

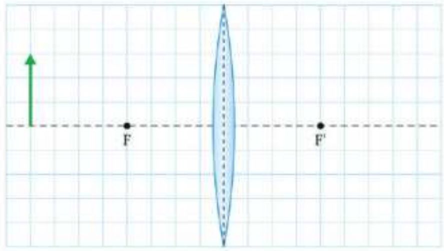
(a)



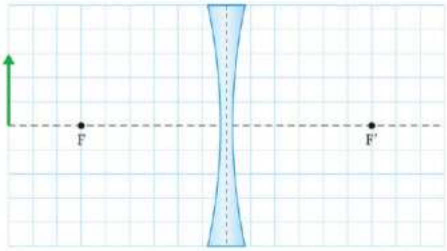
(b)



(c)



(d)



٢. أوجد ما يلي لأقرب رقمين عشريين:

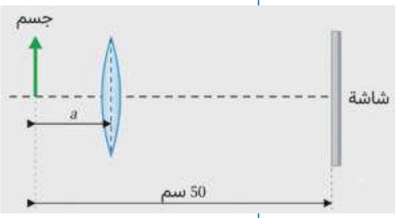
(أ) لكل حالة، أوجد (A) نوع الصورة، (B) موضع الصورة، (C) التكبير.

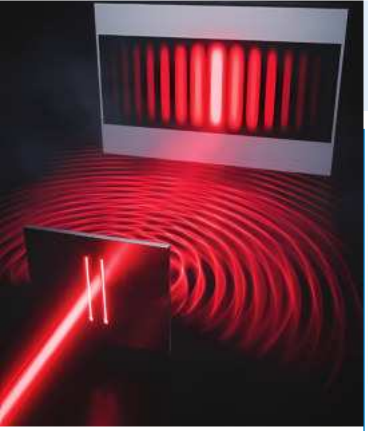
(i) يوضع جسم على بُعد 50 cm أمام عدسة محدبة بُعدها البؤري 30 cm.

(ii) يوضع جسم على بُعد 8.0 cm أمام عدسة محدبة بُعدها البؤري 10 cm.

(iii) يوضع جسم على بُعد 10 cm أمام عدسة مقعرة بُعدها البؤري 15 cm.

(ب) توضع شاشة على بُعد 50 cm من جسم، وتُحرَّك عدسة محدبة بُعدها البؤري 12 cm بين الجسم والشاشة. أوجد جميع قيم المسافة a بين العدسة والجسم التي تتكوَّن عندها صورة واضحة على الشاشة.





الدرس ٢-١١ — تجربة الشق المزدوج ليونج

؟ سؤال الدرس:

عندما يمر ضوء أحادي اللون مترابط عبر شقين ضيقين،
هل تَظهر الشاشة منطقتان مضيئتان فقط، أم نمط تداخل من أهداب مضيئة ومظلمة؟

ستتعلم أن:

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تصف** كيف أن ضوء مترابط يمر من شقين ضيقين يكون أهداب تداخل مضيئة ومظلمة على شاشة

٢. **تربط** بين فرق المسار من الشقين والموضع على الشاشة باستخدام: $\Delta = \frac{dx}{D}$ للزوايا الصغيرة.

٣. **تستخدم** شرط الهدب المضيئة: $\Delta = n\lambda$ وعلاقة تباعد الأهداب: $\Delta y = \frac{\lambda D}{d}$ لحل المسائل والتنبؤ بتغيُّرات النمط.

⭐ حقيقة أساسية:

عندما تلتقي موجتان مترابطتان عند نقطة ما، تتراكب إزاحتاهما، ويحدث التداخل البنَّاء عندما يكون فرق المسار عددًا صحيحًا من الأطوال الموجية:

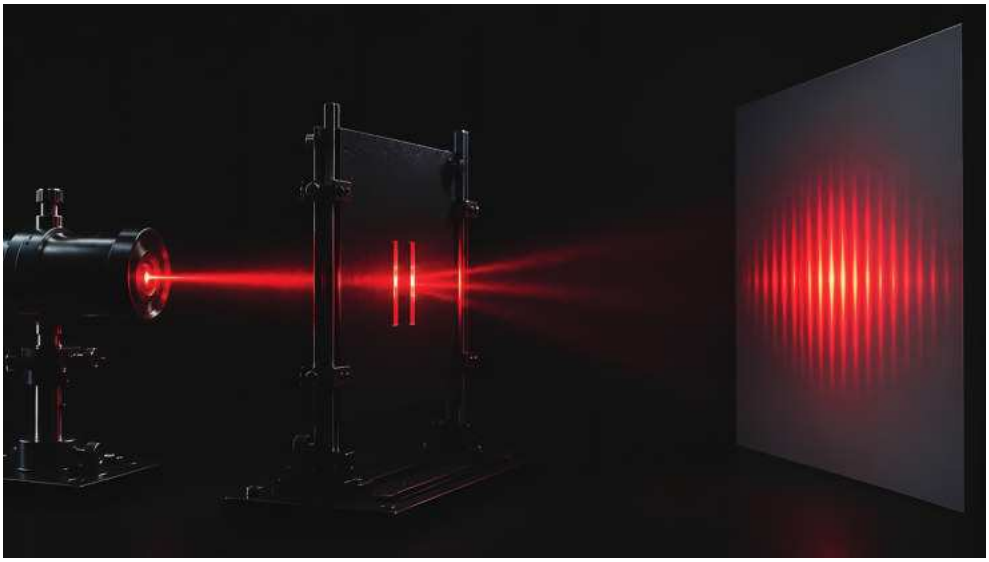
$\Delta = n\lambda$ ، $n = 0, 1, 2, \ldots$

ويحدث التداخل الهدَّام عندما يكون فرق المسار عددًا فرديًّا من أنصاف الأطوال الموجية:

$$\Delta = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

$n = 0, 1, 2, \ldots$

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر



عندما يمر ضوء أحادي اللون من ليزر عبر شقين ضيقين متقاربين، يتراكب الضوء من الشقين على الشاشة. وبدلًا من منطقتين مضيئتين فقط، يتكوَّن نمط من أهداب مضيئة ومظلمة. وتكون الهَدَبة المركزية مضيئة؛ لأن الضوء من الشقين يقطع مسافتين متساويتين إلى مركز الشاشة.

توقَّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) مع فتح الشقين معًا، هل سيظهر على الجدار بقعتان مضيئتان (واحدة لكل شق)، أم صف من أهداب مضيئة عديدة — وأين تكون الأكثر إضاءة؟

(ب) إذا استُخدم شق مزدوج بتباعد أصغر بين الشقين، هل تصبح الأهداب أكثر تقاربًا أم أكثر تباعدًا؟

استكشف — قِس تباعد الأهداب عند مسافات شاشة مختلفة

ما ستفعله: تُمرِّر ضوء ليزر أحادي اللون عبر شق مزدوج ، وتلاحظ أهداب التداخل على شاشة، وتقيس تباعد الأهداب.

الزمن: 12 دقيقة.

ما تحتاجه:

- ليزر أحمر منخفض القدرة.
- شق مزدوج.
- شاشة بيضاء أو جدار غير لامع.
- شريط قياس.
- مسطرة متر.
- غرفة مظلمة.

السلامة: استخدم فقط ليزرًا منخفض القدرة تحت إشراف المعلم. لا توجِّه شعاع الليزر أبدًا نحو أي عين أو سطح عاكس. أبقِ الشعاع أسفل مستوى العين وأطفئه عند عدم الاستخدام.

الخطوات:

١ ضع الشق المزدوج أمام الليزر ووجِّه الشعاع نحو شاشة بيضاء على بُعد عدة أمتار.

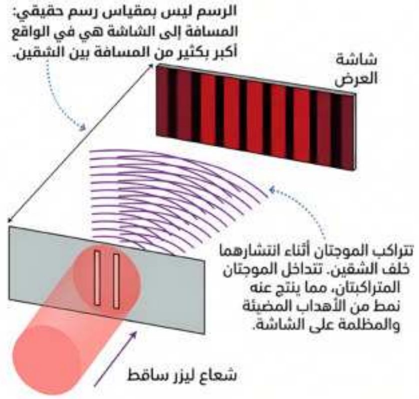
٢ أظلِم الغرفة بحيث يمكن رؤية نمط الأهداب بوضوح.

٣ حدِّد الهدبة المضيئة المركزية والأهداب المضيئة المجاورة على كلا الجانبين.

٤ قِس المسافة عبر عدة أهداب مضيئة متجاورة، ثم اقسم على عدد الفراغات للحصول على متوسط تباعد الأهداب Δy .

٥ قِس مسافة الشق-الشاشة D من الشق المزدوج إلى الشاشة.

٦ حرِّك الشاشة، أبعد، قِس، وسجِّل مسافة الشق-الشاشة الجديدة D، ثم قِس وسجِّل متوسط تباعد الأهداب الجديد $\Delta y'$.


الرسم ليس بمقياس رسم حقيقي: المسافة إلى الشاشة هي في الواقع أكبر بكثير من المسافة بين الشقين.
شاشة العرض
تتراكب الموجتان أثناء انتشارهما خلف الشقين. تتداخل الموجتان المتراكبتان، مما ينتج عنه نمط من الأهداب المضيئة والمظلمة على الشاشة.
شعاع ليزر ساقط

مسافة الشق-الشاشة D/m	المسافة عبر عدة تباعدات هدبية /mm	عدد الفراغات	متوسط تباعد الأهداب $\Delta y/mm$

حلِّل ما جمعته:

(أ) هل أظهرت الشاشة منطقتين مضيئتين فقط، أم نمطًا من عدة أهداب مضيئة ومظلمة؟ أين وقعت الهدبة المضيئة المركزية؟

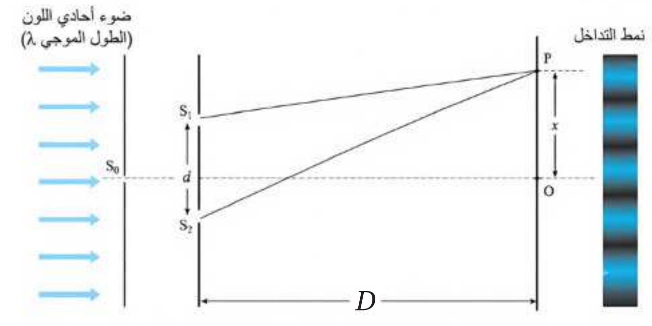
(ب) ماذا حدث لتباعد الأهداب عندما زادت المسافة D من الشقين إلى الشاشة؟

اكتب تفسيرك في سطرين على الأكثر قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، لم تلاحظ بقعتين مضيئتين فحسب، بل سلسلة من أهداب مضيئة ومظلمة متعاقبة، بهدبة مركزية مضيئة. ووجدت أيضًا أن إبعاد الشاشة عن الشقين زاد تباعد الأهداب. ولعلك توقعت أن يُنتج الشقان بقعتين مضيئتين منفصلتين. لكن الضوء من الشقين كليهما يصل إلى كل نقطة على الشاشة، ويعتمد نمط التداخل الناتج على فرق المسارين الموجتين.

ضوء مترابط من شقين



في تجربة يونغ للشق المزدوج، يُضيء شعاع واحد أحادي اللون شقين ضيقين. ويعمل الشقان كمصدرين مترابطين؛ لأن الضوء الخارج منهما له التردد نفسه وفرق طور ثابت. ويتراكب الشعاعان على الشاشة ويتداخلان. وتحدث الأهداب المضيئة حيث تصل الموجتان بالطور نفسه. وتحدث الأهداب المظلمة حيث تصل الموجتان بطورين متعاكسين.

يختلف المساران بمقدار $\frac{dx}{D}$:

بالنسبة لنقطة P على بُعد x من الخط المركزي على شاشة تبعد D عن شقين متباعدين بمسافة d، فرق المسار تقريبًا: $\Delta = |S_1P - S_2P| \approx d\sin\theta \approx \frac{dx}{D}$. ويصح هذا التقريب عندما: $D \gg d$ و $D \gg x$، بحيث تكون الزاوية صغيرة.

تحدث الأهداب المضيئة عندما: $\Delta = n\lambda$ حيث: $n = 0, 1, 2, \ldots$.

وتحدث الأهداب المظلمة عندما: $\Delta = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$. وعند مركز الشاشة: $x = 0$ لذا: $\Delta = 0$ والهدبة المركزية مضيئة.

فرق المسار:

فرق المسار هو المسافة الإضافية المقطوعة إلى النقطة (P) بواسطة الضوء من أحد الشقين مقارنة بالضوء من الشق الآخر.

من الأهداب إلى تباعدها:

بالنسبة للأهداب المضيئة المتجاورة، يزيد فرق المسار بمقدار طول موجي واحد: يزيد Δ بمقدار λ. وبما أن $\Delta = \frac{dx}{D}$، فإن التباعد بين الأهداب المضيئة المتجاورة هو: $\Delta y = \frac{\lambda D}{d}$

نقطة

! عندما يسقط ضوء أحادي اللون على شق (S_0) ثم على شقين مزدوجين $(S_1$ و$S_2)$ ليُكوّن صورة على شاشة، يحدث تداخل للضوء وتُلاحظ مجموعة من الأهداب المضيئة والمظلمة (أهداب التداخل). يعمل الشقان كمصدرين مترابطين لأن الضوء المنبعث منهما له التردد نفسه وفرق طور ثابت. وفي حال كان الشقان $(S_1$ و$S_2)$ في طور متماثل، فإن الحالة عند نقطة (P) على الشاشة تكون كالتالي:

! الأهداب المضيئة: $|S_1P - S_2P| = \lambda \times 2n$

الأهداب المظلمة: $|S_1P - S_2P| = \lambda \times (2n + 1)$؛ حيث $n = 0, 1, 2, \ldots$

! ليكن (d) هو المسافة الفاصلة بين الشقين، و(D) هي المسافة من الشقين إلى الشاشة، بحيث تكون $D \gg d$ (أي أن d أصغر بكثير من D) لتكون الزوايا صغيرة. تكون المسافة الفاصلة بين الأهداب المضيئة المتجاورة هي $= \frac{\lambda D}{d}$؛ وبالتالي، فإن استخدام طول موجي أكبر، أو زيادة المسافة (D)، أو تقليل المسافة الفاصلة بين الشقين (d) يؤدي إلى زيادة التباعد بين الأهداب.

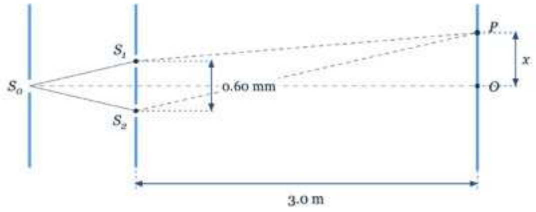
صندوق المعادلات:

تباعد الأهداب في تجربة يونغ للشق المزدوج:	$\Delta y = \frac{\lambda D}{d}$

اقرأ المعادلة قبل التعويض بالقيم العددية.

يُعطى تباعد الأهداب بـ: $\Delta y = \frac{d\lambda}{D}$ وبزيادة الطول الموجي (λ)، أو بزيادة مسافة الشق–الشاشة (D)، فإن تباعد الأهداب (Δ y) يزداد. بينما تقليل التباعد بين الشقين (d) يزيد تباعد الأهداب؛ لأن d في المقام. والنتيجة الأساسية هي: $\Delta y \propto \frac{1}{d}$؛ لذا، فإن تقريب الشقين من بعضهما يجعل الأهداب أكثر تباعدًا.

مثال محلول:

الموقف:	يمر ضوء أحادي اللون عبر شق واحد ثم عبر زوج من الشقوق، منتجًا نمط تداخل على شاشة. ويُقاس تباعد الأهداب، ثم يُدرَس تأثير وضع ماء بين الشقين والشاشة.
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** $n = 1.3$، $D = 3.0$ m، $d = 0.60$ mm، $\Delta y = 2.9$ mm. **المطلوب:** (أ) الطول الموجي λ (ب) تباعد الأهداب الجديد $\Delta y'$ في الماء.
التمثيل:	يُضيء الضوءُ المنبعثُ من الشق المفرد S_0 الشقين S_1 وS_2، اللذين تفصل بينهما مسافة d. وتتراكب الموجات الصادرة عن S_1 وS_2 وتتداخل على الشاشة الموجودة على مسافة D؛ حيث تتكون هدبة مضيئة عند النقطة P –التي تبعد مسافة x عن النقطة المركزية O– عندما يكون فرق المسارين الموجتين القادمتين من الشقين مساوياً لعدد صحيح من الأطوال الموجية. 
الاستراتيجية:	تُفصَل الأهداب المضيئة المتتالية بتباعد الأهداب $\Delta y = \frac{\lambda D}{d}$؛ أعد ترتيبها لإيجاد λ. ثم يُقلّل الماء الطول الموجي إلى $\lambda' = \frac{\lambda}{n'}$، وأعد الحساب لإيجاد $\Delta y'$.
الحل الموضح:	(أ) $\lambda = \frac{d\Delta y}{D} = \frac{(0.60 \times 10^{-3})(2.9 \times 10^{-3})}{3.0} = 5.8 \times 10^{-7}$ m (ب) $\lambda' = \frac{\lambda}{n}$. $\Delta y' = \frac{D\lambda'}{d} \approx 2.2$ mm.

نصيحة امتحانية:

اكتب دائمًا الصيغة بشكل رمزي، مع إعادة ترتيبها وفقًا للكمية المطلوبة، قبل التعويض بأي أرقام:

$$\Delta y = \frac{\lambda D}{d}$$

$$\lambda = \frac{d\Delta y}{D}$$

هذا يجعل طريقتك واضحة ويكسبك علامات على الطريقة. ثم استبدل وقرِّب بعناية؛ لأن القيمة النهائية تُقيَّم بشكل منفصل.

منطقية الحل:	الطول الموجي $(580\ \text{nm})\ 5.8 \times 10^{-7}\ m$ يقع في المنطقة المرئية من الطيف. وفي الماء ينخفض الطول الموجي فينخفض تباعد الأهداب: $\Delta y' = 2.2\ \text{mm} < \Delta y = 2.9\ \text{mm}$، بما يتفق مع $\Delta y \propto \lambda$.
فسِّرها بنفسك:	فسِّر: لماذا ينخفض التباعد بين أهداب التداخل عندما ينتقل الضوء من الهواء إلى الماء؟

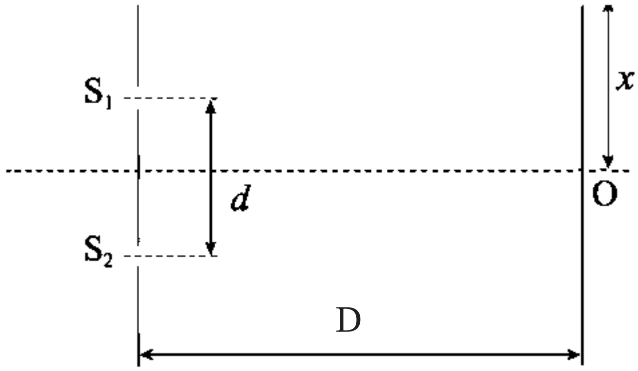
حقيقة أساسية:

توضح العلاقة $y = \frac{\lambda D}{d}$ كيف يؤثر كل متغير على تباعد الأهداب.

بما أن λ و D في البسط، فإن زيادة أي منهما تزيد من s. وبما أن d في المقام، فإن تقليل المسافة بين الشقين يزيد من s.

إذا انتقل الضوء عبر وسط متجانس معامل انكساره n، فإن طول موجته يصبح $\lambda_{\text{وسط}} = \lambda_0 n$، حيث λ_0 هو طول موجته في الهواء أو الفراغ. لذلك، $y_{\text{وسط}} = y_{\text{هواء}} n$

حاول:



كما في الشكل، يمر ضوء أحادي اللون طوله الموجي $\lambda\,[m]$ عبر شق واحد S_0، ثم شقين S_1 و S_2. تتكوَّن أهداب مضيئة ومظلمة على شاشة. والتباعد بين الشقين $d\,[m]$ ومسافة الشق–الشاشة $D\,[m]$.

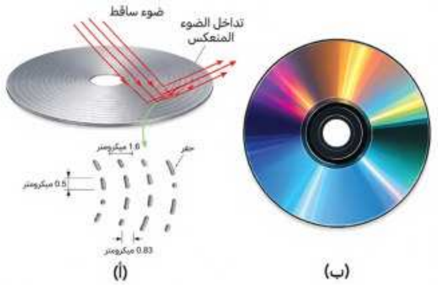
(أ) إذا زادت D، حدِّد ما إذا كان التباعد بين الأهداب المضيئة المتجاورة يصبح أصغر أم أكبر.

(ب) إذا قلَّت d، حدِّد ما إذا كان التباعد بين الأهداب المضيئة المتجاورة يصبح أصغر أم أكبر.

(جـ) تُملأ المنطقة بين الشقين والشاشة بسائل معامل انكساره n. أوجد العامل الذي يتغيَّر به التباعد بين الأهداب المضيئة المتجاورة.

في سياق جديد — الألوان الطيفية المرئية على قرص مضغوط

تعمل المسارات المتقاربة جدًّا على قرص مضغوط أو DVD كمحزوز حيود. وعندما ينعكس ضوء أبيض من هذه المسارات المتساوية التباعد بانتظام، تخضع أطوال موجية مختلفة لتداخل بنَّاء في اتجاهات مختلفة؛ لذا، تُرى ألوان مختلفة بزوايا مشاهدة مختلفة. ومع تغيُّر زاوية المشاهدة، تخضع أطوال موجية أخرى لتداخل بنَّاء نحو العين، منتجة تسلسلًا متغيِّرًا من الألوان.



استخدام فكرة أن أطوالًا موجية مختلفة تخضع لتداخل بنَّاء بزوايا مختلفة، فسِّر في جملة أو جملتين لماذا يُنتج القرص المضغوط طيفًا من الألوان بدلاً من بقعة مضيئة واحدة.

طبيعة العلم: العلم مسعى مشترك — القبول التدريجي لدليل تداخل يونغ

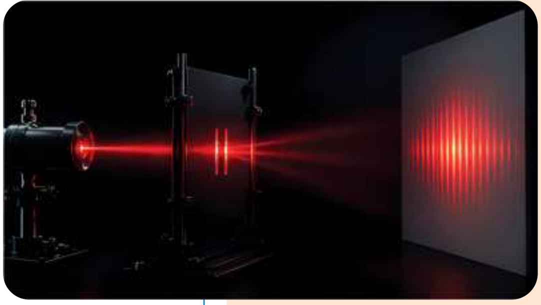
قدَّمت تجربة يونغ للشق المزدوج دليلًا قويًا على الطبيعة الموجية للضوء لأنها أنتجت أهداب تداخل، وفي ذلك الوقت، كان النموذج الجسيمي للضوء مقبولًا على نطاق واسع، لذا لم يُقبَل التفسير الموجي فورًا، وعزَّز عمل لاحق، خصوصًا لأوغستان-جان فرينل، النموذج الموجي وساعد على ترسيخه على نطاق أوسع.

دورك الآن: اقترح سببًا واحدًا يجعل دليلًا تجريبيًّا قويًّا، كأهداب يونغ، يستغرق جيلًا كاملًا ليُقبَل.

⭐ كتيِّب البيانات:

المعادلة $y = \frac{\lambda D}{d}$؛ أعد ترتيبها إلى $\lambda = \frac{yd}{D}$، واحتفظ بالأطوال بالمتر، وقم بالتحويل إلى الوحدة المطلوبة فقط في النهاية.

سؤال الدرس، وإجابته:

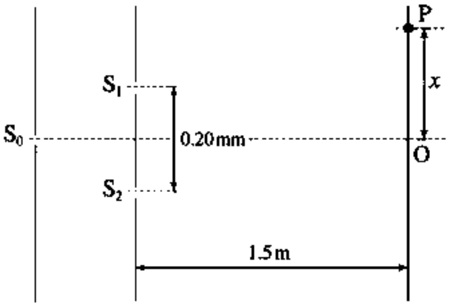


عندما يُضيء ضوء أحادي اللون مترابط شقين ضيقين، يظهر على الشاشة نمط تداخل من أهداب مضيئة ومظلمة بدلًا من منطقتين مضيئتين منعزلتين. ويعمل الشقان كمصدرين مترابطين، وتتراكب الموجتان الخارجتان وتتداخلان. وتكون الهدبة المركزية مضيئة لأن فرق المسار عندها يساوي صفرًا. وللزوايا الصغيرة، فرق المسار عند نقطة على بُعد x من المركز تقريبًا $\Delta \approx \frac{dx}{D}$. وتحدث الأهداب المضيئة عندما $\Delta = n\lambda$، وتحدث الأهداب المظلمة عندما $\Delta = \left(n + \frac{\lambda D}{d}\right)\lambda$، حيث $n = 0, 1, 2, 3, \ldots$ لذا، تُفصَل الأهداب المضيئة المتجاورة بمسافة $\Delta y = \frac{\lambda D}{d}$.

تمرين:

(أ) يمر ضوء أحادي اللون طوله الموجي $\lambda\,[m]$ عبر شق واحد S_0، ثم شقين S_1 و S_2، مُكوِّنًا أهدابًا مضيئة ومظلمة على شاشة. والتباعد بين الأهداب المضيئة المتجاورة يساوي 4.5 mm. والتباعد بين الشقين 0.20 mm ومسافة الشق-الشاشة 1.5 m.

(i) أوجد الطول الموجي $\lambda\,[\mathrm{m}]$ للضوء.



(ii) تُملأ المنطقة بين الشقين والشاشة بماء (معامل انكساره 1.3). أوجد التباعد الجديد بين الأهداب المضيئة المتجاورة، بالمليمتر.

(ب) في نمط شق مزدوج، حدِّد في كل حالة أدناه ما إذا كان التباعد بين الأهداب المضيئة المتجاورة يصبح أكبر أم أصغر:

(i) يزيد التباعد بين الشقين.

(ii) تُحرَّك الشاشة أبعد عن الشقين.

(iii) يتغيَّر الضوء إلى طول موجي أكبر.

سؤال بأسلوب الامتحان:

في تجربة شق مزدوج، التباعد بين الشقين $d = 0.40\,\mathrm{mm}$ والشاشة على بُعد $D = 2.0\,\mathrm{m}$. وللضوء طول موجي $\lambda = 6.0 \times 10^{-7}\,\mathrm{m}$. أوجد التباعد بين الأهداب المضيئة المتجاورة، بالمليمتر.

المؤلفون

Maki Komizo
Yukihiro Kawakubo
Tomoaki Tsunoyama
Yoko Sasamori
Yuki Toda
Ritsu Igarashi
Yasser Mahdy
Kotomi Shirai (Designer)

المراجعون

أ.د. هاني نظمي سليمان
أ.د. هند علي محمد علي
أ.د. إسلام محمد شيحة
أ.د. وليد محمد أحمد دسوقى
د. عزيزة رجب خليفة
د. حنان أبو العباس محمد
أ. أيمن شوقي السيد
أ. سعيد محمد على
أ. نورة محمد عبد المجيد

الإشراف العام

د. جبريل أنور حميدة
رئيس الادارة المركزية لتطوير المناهج

EDUCATION SPRINGS NEW LIFE

وزارة التربية والتعليم والتعليم الفني

MINISTRY OF EDUCATION AND TECHNICAL EDUCATION

E = mc²
$X_{n+1} = aX_n(1-X_n)$
$\log_a(xy) = \log_a x + \log_a y$

الفيزياء

البكالوريا المصرية

الجـزء الثانـى

الصف
11

SPRIX

الفيزياء

البكالوريا المصرية

الصف الثاني

Advised by
INTERNATIONAL
BACCALAUREATE®

The International Baccalaureate™

has reviewed the pedagogical and assessment approaches underpinning this textbook.

© 2026 Ministry of Education and Technical Education
All rights reserved.
Copyrights and accountability for the content of this textbook remain with the Ministry of Education and Technical Education.
No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system,
or transmitted in any form or by any means - electronic, mechanical, photocopying, recording,
or otherwise - without the prior written permission of the copyright holders.

Ministry of Education and Technical Education
New Administrative Capital
Cairo, Egypt

مقدمة

تجسيدًا لرؤية نظام البكالوريا المصرية والتزامها بإعداد متعلمين قادرين على مواكبة متطلبات القرن الحادي والعشرين، يأتي تطوير كتاب الفيزياء للصف الثاني الثانوي ليقدم للطلاب تجربةً تعليمية رصينة، ممتعة، ومحفزة فكريًّا. وقد صُمم هذا المنهج لترسيخ الفهم المفاهيمي العميق، وبناء الثقافة العلمية، مع تمكين المتعلمين من تطبيق المعارف والمهارات الفيزيائية في سياقات الحياة الواقعية.

تقوم فلسفة هذا الكتاب على التعلم القائم على الاستقصاء؛ حيث يبني الطلاب فهمهم ذاتيًّا عبر الملاحظة، والتساؤل، والبحث، والتفكير المستند إلى الأدلة. وينطلق التعلم من ظواهر حيوية، ومواقف حقيقية، وخبرات استكشافية تستثير الفضول، وتدفع المتعلمين إلى البحث عن تفسيرات علمية للعمليات والأنشطة الفيزيائية في محيطهم. وعبر هذا النهج، يُوجَّه الطلاب لاستكشاف الأنماط، وصياغة التفسيرات، وبناء الاستيعاب العلمي قبل الخوض في المفاهيم والمبادئ والقوانين والنماذج الرسمية.

يعكس تنظيم كل درس تسلسلًا متناغمًا ينطلق من الاستكشاف وصولًا إلى بناء المفهوم وتطبيقه؛ متبعًا في ذلك استراتيجية (**التهيئة - الشرح - حلل - حاول - تمرين**)؛ حيث يُقدَّم للطلاب أولًا سياقات وظواهر ونماذج مختارة بعناية، لربط التعلم الجديد بالمعارف السابقة والخبرات اليومية. وتُشكّل هذه المقدمات الجاذبة حافزًا للاستقصاء، يُحفّز المتعلمين على تحليل الملاحظات، وتفسير الأدلة، وتحديد الأنماط، وصياغة تفسيرات أولية. وتأسيسًا على هذه المرحلة الاستكشافية، يتفاعل الطلاب مع المفاهيم، والمبادئ، والقوانين، والنماذج الفيزيائية الجوهرية التي تفسر تلك الظواهر وتمنحهم إطارًا منظمًا لفهم العالم الطبيعي. وقد نُظّم المحتوى هادفًا إلى ترسيخ **الفهم المفاهيمي العميق عوضًا عن الحفظ التلقيني**، مما يُمكّن المتعلمين من إدراك العلاقات بين المفاهيم، وإقامة روابط وثيقة بين الأفكار، وتطبيق معارفهم بثقة في سياقات جديدة ومبتكرة. وعبر محطتي (جرِّب) و(تمرين)، تُتاح للطلاب فرص حيوية لممارسة ما اكتسبوه وتطبيقه، وصولًا إلى بناء استيعابٍ رصين ومترابط ومتكامل لعلم الكيمياء.

ويتيح هذا الكتاب **مساراتٍ رحبة للتجريب، وحل المشكلات، والاستقصاء المستقل**؛ حيث يُحفّز الطلاب على اختبار الأفكار، وجمع البيانات وتحليلها، وتقييم الأدلة، والتوصل إلى استنتاجات مدعومة بالأدلة. وعبر هذه الخبرات العملية، يكتسب المتعلمون ثقةً راسخة في توظيف التفكير العلمي، ليتحولوا إلى مشاركين فاعلين في بناء المعرفة، تجاوزًا لنمط التلقِّي السلبي للمعلومات.

يتكامل التقييم في عملية التعلم بوصفه أداة للتعلم والتحسين المستمر معًا. وتتيح الدروس محطات متنوعة للتقييم التكويني والختامي، تُمكن الطلاب من رصد تقدمهم، وتحديد مجالات نموهم المعرفي، وإظهار عمق فهمهم. وقد صُممت مهام التقييم بعناية لتُحاكي نمط الأسئلة الاختبارية، مع التركيز على تحفيز مهارات التفكير العليا، والتحليل، وتطبيق المعارف في سياقات جديدة وغير مألوفة.

أُولي اهتمام خاص لإبراز طبيعة العلم بوصفها ركيزةً أساسية للثقافة العلمية؛ حيث تُتاح للطلاب فرص لفهم كيفية توليد المعرفة العلمية، والتحقق من صحتها وتنقيحها، ونقلها داخل الأوساط العلمية. كما يشجع المنهج على تقدير إسهامات العلماء والمبتكرين الذين شكّلت اكتشافاتهم فهمنا للعالم الفيزيائي وأسهمت في تقدم الإنسانية.

يطوِّر الكتاب بصورة منهجية مهارات عمليات العلم، بدءًا من الملاحظة والقياس والتصنيف مرورًا بالاستدلال، والتنبؤ، والتجريب، وصولًا إلى تفسير البيانات والنمذجة والتواصل العلمي. وتتكامل هذه المهارات ضمن خبرات التعلم؛ لضمان ألّا يقتصر دور الطلاب على استيعاب المعرفة العلمية فحسب، بل يمتد إلى بناء الكفاءات اللازمة للتفكير والممارسة بأسلوب علمي.

وتناغمًا مع تطلعات التعليم المعاصر، يُرسِّخ المنهج أبعاد الوعي العالمي والانفتاح الدولي؛ عبر ربط مفاهيم الفيزياء بالممارسات العلمية العالمية، والابتكارات التقنية، فضلًا عن التحديات البيئية وأهداف التنمية المستدامة. كما يحفز الطلاب على استيعاب الطبيعة المترابطة للمعرفة العلمية، وإدراك الدور المحوري للفيزياء في معالجة القضايا المؤثرة في المجتمعات على المستويات المحلية، والوطنية، والعالمية.

علاوة على ذلك، يستهدف المنهج تنمية التفكير الناقد والإبداعي؛ عبر إشراك الطلاب في تحليل الأدلة، وتقييم التفسيرات البديلة، وابتكار حلول ريادية، وتطبيق المعرفة العلمية في مواجهة تحديات واقعية. كما يُحفِّز المتعلمون على مقاربة المشكلات بمنظور العلماء والفيزيائيين والمهندسين؛ مستندين إلى التفكير المنظومي وهندسة التصميم لاستقصاء الأسئلة وتطوير حلول عملية.

الدمج المتعمد بين مفاهيم الفيزياء وحياة الطلاب وخبراتهم إحدى السمات الجوهرية لهذا الكتاب؛ حيث تُطرح الأفكار العلمية عبر الفصول ضمن سياقات دلالية حيوية، مدعومةً بتطبيقات معاصرة مستمدة من الصناعة، والصحة، والتقنية، والطاقة، والاستدامة، والحياة اليومية. وتعمل هذه الروابط على ترسيخ أهمية الفيزياء في وجدان المتعلمين، بما يُمكِّنهم من تقدير دورها المحوري في فهم العالم من حولهم والارتقاء به.

ومن الأبعاد الجوهرية أيضًا التزام المنهج بتعزيز التعلم التأملي؛ إذ يُحفِّز الطلاب على الانخراط في التقييم الذاتي والتفكير ما وراء المعرفي، مما يُمكِّنهم من رصد مستويات فهمهم، وتقييم استراتيجياتهم الدراسية، وتحمّل مسئولية أكبر تجاه نموهم الأكاديمي. ومن خلال التأمل في محتوى تعلمهم وآلياته، يكتسب الطلاب عادات التعلم المستمر مدى الحياة، ليكونوا قادرين على التكيف مع مختلف التحديات والفرص المستجدة.

في نهاية المطاف، يهدف هذا الكتاب إلى بناء جيلٍ من المتعلمين المثقفين علميًّا، والمسئولين، والمبدعين؛ مزودين بالمعارف، والمهارات، والقيم، والاتجاهات الكفيلة بتحقيق نجاحهم في عالمٍ سريع التغير. ونأمل أن تُلهم هذه الرحلة التعليمية الطلاب لاستكشاف الفيزياء بشغف، والتفكير بمنهجية، والعمل بمسئولية؛ بما يضمن إسهامهم الفاعل في رقيِّ المجتمع، ورسم مستقبلٍ مستدامٍ للإنسانية.

كيف تستخدم هذا الكتاب

يتّبع كل درس نفس التسلسل: الملاحظة، التوقَّع (التنبؤ)، القِياس، التسمية.

١ **سؤال الدرس**

الفكرة الكبيرة المطلوب الإجابة عنها

٢ **ستتعلم أن**

أهداف واضحة لهذا الدرس

٣ **الظاهرة — توقّع (تنبأ) أولًا**

شاهدها، ثم اكتب توقعك

٤ **استكشف**

جرِّبها ولاحظ الأنماط

٥ **مثال محلول (لماذا؟)**

طريقة الحل الموضحة مع التعليل

٦ **جرِّب بنفسك**

طبِّق الفكرة بنفسك

٧ **تحقّق من فهمك**

اختبار ذاتي سريع

٨ **تطبيق سريع**

طبِّق الفكرة في سياق جديد

٩ **سؤال ربط**

اربط الأفكار عبر الدرس

١٠ **صندوق المعادلات**

مفتاح المعادلات في لمحة

١١ **طبيعة العلم**

تعرَّف كيف تتطور الأفكار العلمية

١٢ **بأسلوب الامتحان**

طبِّق ما تعلمته في سياق امتحاني

ما الذي يميز هذا الكتاب؟

- إنه لا يكتفي بسرد حقائق الفيزياء — بل يدرِّبك كفيزيائي.
- توقَّع قبل الشرح، ثم اختبر أفكارك في ضوء الأدلة.
- فهم لماذا تعمل كل طريقة، اكتشف المفاهيم الخاطئة، واربط الأفكار عبر الدرس.

كيف يسير التعلّم هنا؟

١. الملاحظة

يحدث أمر واقعي
ويكسر ما كنت تتوقعه.

٢. التوقّع (التنبؤ)

سجِّل توقعك
قبل أن تُكمل القراءة.

٣. القياس

نفِّذ ذلك بيديك
واجمع البيانات.

٤. التسمِية

تعلَّم المصطلح (المفهوم)
العلمي بعد بناء الفكرة،
لا بأن تحفظه أولًا.

ابدأ بالظاهرة
دع الأدلة تبني التفسير (الشرح).

الأدوات

- ① التقنيات التجريبية
- ② التكنولوجيا
- ③ الرياضيات

الاستقصاء

- ① الاستكشاف والتصميم
- ② جمع البيانات ومعالجتها
- ③ الاستنتاج والتقييم

كيف تتم عملية التعلم هنا؟

اقرأ هذه الصفحة مرة واحدة، ثم عُد إليها كلما احتجت إليها؛ فهي تنطبق على كل درس في الكتاب.

يعتمد كل درس على مسار واحد من الإجراءات.

يلاحظ ← يتنبأ ← يقيس ← يسمى

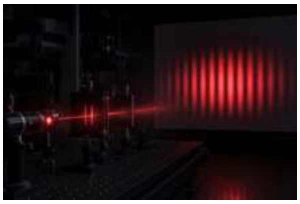
- يلاحظ – يحدث شيء حقيقي غير ما توقعته انت.
- يتنبأ — تقوم بالتخمين كتابيًا، قبل مواصلة القراءة.
- يقيس – يمكنك القيام بذلك بيديك وجمع الأرقام.
- يسمى – الآن فقط تصل إلى المصطلح ويكون مكتسب، ليس محفوظا.

دوّن توقعاتك كتابةً؛
فالتخمينات الخاصة بك
تُعدّ بياناتٍ يبنى عليها،
وليست مجرد زينة.

أين يقع هذا المصطلح في منهج الفيزياء

(جـ) الطبيعة الجسيمية للمادة هذا المصطلح • الغازات والحرارة

(د) المجالات هذا المصطلح • الكهرباء والمغناطيسية

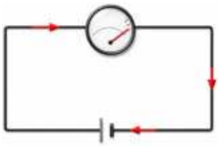


(هـ) الفيزياء النووية وفيزياء الكم هذا المصطلح • الكوانتم

الوحدات الخمس لهذا الفصل الدراسي.

الفصل الأول الغازات والحرارة الدروس (١–١) - (١–٦)

الفصل الثانى الكهرباء السكنة الدروس (٢–١) - (٢–٦)



الفصل الثالث التيار الكهربى والدوائر الدروس (٣–١) - (٣–٢)

الفصل الرابع المغناطيسية والحث الكهرومغناطيسى الدروس (٤–١) - (٤–٥)

الفصل الخامس الطبيعة الكمية للضوء والمادة الدروس (٥–١) - (٥–٣)

بناءً على الفصل الدراسي الأول: (أ): الميكانيكا (القوى والحركة). (ب) الحركة الاهتزازية والموجات.

الأدوات:

١) التقنيات التجريبية ٢) التكنولوجيا ٣) الرياضيات.

دورة الاستقصاء: الاستكشاف والتصميم • الجمع والمعالجة • الاستنتاج والتقييم — ستواجه هذه المراحل في كل نشاط استكشافي.

الأمانة الأكاديمية: يجب أن تكون التوقعات نتاج عملك الخاص — احرص على ذكر المصادر، ولا تنسب لنفسك إلا ما أنجزته أنت.

المحتوى

الفصل الأول - الغازات والحرارة

١–١ قانون بويل–شارل ٢
١-٢ معادلة الحالة للغاز المثالي (قانون الغاز المثالي) (القانون العام للغازات) ٩
١-٣ حركة جزيئات الغاز ١٤
١-٤ الطاقة الداخلية للغاز ٢٢
١-٥ تغيرات حالة الغاز والحرارة والشغل ٣٠
١-٦ السعة الحرارية المولية ٣٧

الفصل الثانى - الكهرباء الساكنة

٢-١ قانون كولوم ٤٤
٢-٢ المجال الكهربى ٥٢
٢-٣ الجهد الكهربى ٥٩
٢-٤ المجال الكهربائي المنتظم وفرق الجهد ٦٦
٢-٥ حركة الشحنات تحت تأثير قوة كهروستاتيكية ٧٢
٢-٦ المكثف ٧٨

الفصل الثالث - التيار الكهربي والدوائر

٣-١ الأميتر والفولتميتر ٨٥
٣-٢ قانونا كيرشوف ٩٢

الفصل الرابع - المغناطيسية والحث الكهرومغناطيسي

٤-١ المجال المغناطيسي الناتج عن تيار كهربى ١٠١
٤-٢ القوة المؤثرة على تيار كهربى بواسطة مجال مغناطيسي ١٠٨
٤-٣ حركة الجسيمات المشحونة في مجال مغناطيسي ١١٥
٤-٤ الحث الكهرومغناطيسي ١٢٢
٤-٥ الحث الذاتي ١٢٩

الفصل الخامس - الطبيعة الكمية للضوء والمادة

٥-١ الطبيعة الجسيمية للضوء ١٣٧
٥-٢ الأشعة السينية ١٤٤
٥-٣ موجات المادة ١٥١

الفصل الأول

الغازات والحرارة

١-١ قانون بويل–شارل

١-٢ معادلة الحالة للغاز المثالي

١-٣ حركة جزيئات الغاز

١-٤ الطاقة الداخلية للغاز

١-٥ التغيرات في حالة الغاز والحرارة/الشغل

١-٦ السعة الحرارية المولية

الدرس ١-١ — قانون بويل–شارل

؟ سؤال الدرس:

ما العلاقة التى تربط كلًّا من الضغط والحجم ودرجة الحرارة المطلقة لكمية ثابتة من الغاز؟

ستتعلم

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. تحسب ضغط الغاز من القوة العمودية المؤثرة على وحدة المساحة باستخدام العلاقة $P = \frac{F}{A}$

*وحدة قياس الضغط: -الباسكال (Pa).

٢. تحدد ضغط غاز محبوس بواسطة مكبس من خلال تطبيق اتزان القوى المؤثرة على المكبس.

٣. تطبّق قانون بويل–شارل (ثابت = $\frac{PV}{T}$) لربط حالة كتلة ثابتة من الغاز المثالي قبل التغير وبعده.

حقيقة أساسية:

الضغط P — القوة العمودية التي تؤثر على وحدة المساحات، $P = \frac{F}{A}$ تُقاس بالباسكال (Pa)؛ $1\ Pa = 1\ N/m^2$.

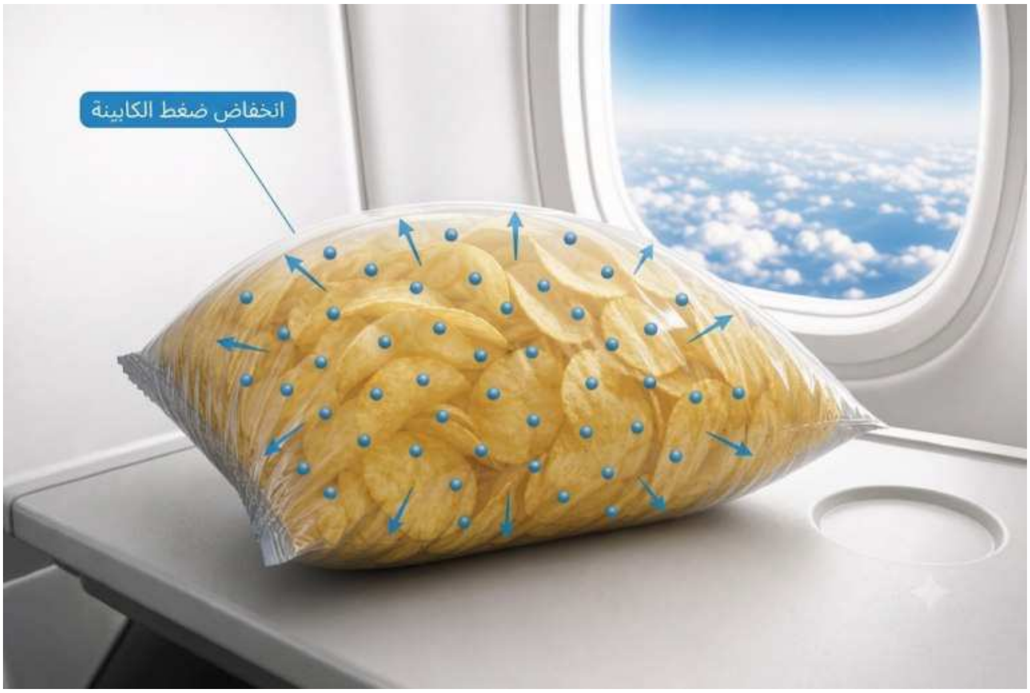
الظاهرة — تنبأ قبل أن تستمر

على متن طائرة أثناء التحليق على ارتفاع عالٍ، يكون ضغط الهواء داخل المقصورة مضبوطًا، لكنه أقل من الضغط الجوي عند سطح الأرض P_o.

لذلك، فإن كيسًا مغلقًا من رقائق البطاطس تم تعبئته وإغلاقه على سطح الأرض ينتفخ عند صعود الطائرة؛ لأن الغاز المحبوس بداخله يتمدد حتى يصل إلى اتزان ميكانيكي جديد.

إذا ظل الضغط الخارجي تقريبًا ثابتًا، فإن تسخين الغاز يؤدي إلى زيادة حجمه، بينما تبريد الغاز يؤدي إلى انخفاض حجمه.

وبالتالي، بالنسبة إلى كمية ثابتة من الغاز، فإن الحجم يعتمد على كلٍّ من الضغط ودرجة الحرارة المطلقة وتُقاس درجة الحرارة المطلقة بوحدة الكلفن $T[K] = T\ ^{o}C + 273$



الشكل (1.1.1): ينتفخ كيس رقائق بطاطس محكم عند ارتفاع الطائرة؛ لأن الضغط داخل الكابينة أقل من الضغط الجوي عند سطح الأرض، فيتمدد الغاز المحبوس حتى يصل إلى اتزان ميكانيكي جديد.

تنبأ:

أ) عندما تُضغط كمية ثابتة من الغاز عند درجة حرارة ثابتة، هل يرتفع ضغطها أم ينخفض أم يظل ثابتًا؟

ب) عندما تُسخَّن كمية محبوسة من الغاز عند ضغط ثابت، هل يزداد حجمها أم يقل أم يظل ثابتًا؟

استكشف — اضغط الهواء المحكم

ما ستفعله: احبس كتلة ثابتة (معينة) من الهواء داخل محقن (سرنجة)، ثم غيّر كمية واحدة في كل مرة لتتعرف العلاقة بين الضغط والحجم ودرجة الحرارة المطلقة.

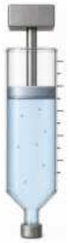
الزمن: 15 دقيقة

ما تحتاجه (الأدوات): • محقن كبير مزود بغطاء (مسدودة) • مسطرة أو قدم ذات ورنية
• كتل مشقوقة • ترمومتر • حمام مائي

حمام مائي ترمومتر كتل مشقوقة سرنجة (محقن) مزودة بغطاء

شكل (2.1.1)

الخطوات:


الشكل (3.1.1): محقن مزود بغطاء محكم موضوع رأسيًّا؛ يضغط حمل معلوم على المكبس، ويُقرأ حجم الهواء المحبوس V من تدريج الأسطوانة (السرنجة أو المحقن)، بينما تكون الفوهة مغلقة.

١ أغلق فوهة المحقن، ومن دون حمل اقرأ حجم الهواء المحبوس V على تدريج المحقن، واعتبر ضغطه P مساويًا للضغط الجوي.

٢ أضف الكتل المشقوقة إلى المكبس واحدة تلو الأخرى لزيادة الضغط P مع ثبوّت درجة الحرارة وسجّل الحجم V بعد كل إضافة.

٣ احسب حاصل الضرب V × P في كل محاولة، وسجّله في العمود الأخير.

٤ أزل الأحمال، ثم ضع المحقن كاملًا في حمام مائي وسخنه. اقرأ الحجم V مقابل درجة الحرارة المطلقة T مع ثبوت الضغط.

المحاولة	الحمل على المكبس	الضغط P (KPa)	الحجم V (mL)	V × P (mL.KPa)
١	دون حمل			
٢	كتلة واحدة			
٣	كتلتان			

تجربة التسخين (الخطوة 4) — ثبّت الحمل بحيث يظل الضغط ثابتًا، وسخّن الهواء المحبوس في الحمام المائي، ثم سجّل حجم الهواء عند درجات الحرارة المطلقة.

القراءة	T (K)	الحجم V (mL)	V × P (mL/KPa)
بارد			
دافء			
ساخن			

حلّل ما جمعته:

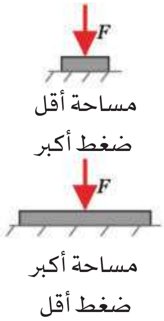
(أ) مع زيادة الضغط P عند ثبوت درجة الحرارة، ماذا يحدث للحجم V؟ انظر إلى قيم العمود الأخير: ماذا تلاحظ في حاصل الضرب $P \times V$؟

(ب) في تجربة التسخين عند ضغط ثابت، تنبأ بشكل منحنى V مقابل درجة الحرارة المطلقة T، واذكر ما تتوقع حدوثه للنسبة V/T؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تنتقل إلى الجزء التالي.

من الملاحظة إلى النموذج:

الضغط قوة موزعة على مساحة:



الشكل (4.1.1): الغاز المحبوس أسفل مكبس لا يحدد ضغطه بنفسه؛ فالمكبس يطفو في حالة اتزان، ولذلك يتحدد ضغط الغاز من خلال اتزان القوى المؤثرة على المكبس، كما هو موضح في المثال.

يقيس الضغط مدى تركُّز قوة الدفع؛ فعندما تتوزع القوة نفسها على مساحة أكبر، فإنها تضغط بقوة أقل على كل جزء من السطح. لذلك نقسم القوة على المساحة التي تؤثر عليها: $P = \frac{F}{A}$

تتحول علاقتان تناسبيتان إلى قانون واحد:

ارجع إلى العمودين اللذين أكملتهما. في تجارب التحميل، ظل حاصل الضرب $P \times V$ ثابتًا تقريبًا، رغم أن الضغط والحجم تغيّرا بشكل كبير. أما في تجارب التسخين، فكانت النسبة $\frac{V}{T}$ هي التي ظلت ثابتة.

كل عمود يمثل نتيجة مهمة في حد ذاته، لكنه يظل صحيحًا فقط عندما تكون الكمية الثالثة ثابتة؛ بينما التغير الحقيقي يجعل كلًّا من P وT يتغيران معًا. لذلك، نقسم التغير إلى مرحلتين، ونستخدم كل علاقة في الحالة التي تنطبق عليها.

نبدأ بالحالة: (P_1, V_1, T_1)

أولًا: نغيّر الضغط إلى P_2 مع بقاء درجة الحرارة عند T_1. من علاقة التحميل: $P_1V_1 = P_2V$

حيث V هو الحجم الذي يصل إليه الغاز في هذه المرحلة الوسيطة.

ثم نسخّن الغاز حتى تصل درجة حرارته إلى T_2، مع تثبيت الضغط عند P_2. ومن علاقة التسخين: $\frac{V}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$

ومنها: $V = \frac{V_2T_1}{T_2}$

نعوّض عن 'V في المعادلة الأولى، فنجد أن 'V—وهي الكمية التي تنتمي فقط إلى المرحلة الوسيطة—تُختصر، لنحصل على: $P_1V_1 = P_2V_2 \frac{T_1}{T_2}$

وبالتالي: $\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$

كانت المرحلة الوسيطة مجرد وسيلة للوصول إلى النتيجة؛ أما الكمية التي تبقى ثابتة قبل التغير وبعده فهي: $\frac{PV}{T}$

وهذا هو السبب في إمكانية استخدام قانون واحد بدلًا من قانونين.

ملاحظة القياس:

قِس قطر المكبس $d = 2r$ (حيث r نمثل نصف القطر) مرة واحدة، ثم احسب مساحة مقطعه من $(A = \pi r^2 = \pi \frac{d^2}{4})$ ويعطي كل حمل كتلته m ضغطًا مقداره $P = Po + mg/A$ اترك المكبس حتى يستقر قبل القراءة، وثبّت درجة الحرارة عند تغيير الحمل، واعتمد على نمط النتائج عبر المحاولات أكثر من اعتمادك على قراءة منفردة.

حقيقة أساسية

يُعرَّف الباسكال (Pa) بأنه:

$1\ Pa = 1\ N/m^2$

أي أن 1 باسكال = 1 نيوتن لكل متر مربع.

ويبلغ الضغط الجوي القياسي تقريبًا:

$1.0 \times 10^5\ Pa$

مصطلح:

الغاز المثالي (Ideal gas): هو نموذج مثالي مفيد. تتصرف الغازات الحقيقية بصورة قريبة جدًا من الغاز المثالي عند درجات الحرارة المعتادة والضغوط المتوسطة؛ لكن دقة هذا النموذج تقل عندما يكون الغاز شديد البرودة أو مضغوطًا بشدة، فتتقارب جزيئاته بدرجة تجعل حجمها والقوى المتبادلة بينها مؤثرين. الغاز المثالي هو غاز تُهمَل فيه أحجام الجزيئات وقوى التجاذب بينها، ويصدق عليه قانون بويل–شارل صدقًا تامًّا.

نقطة

! عندما يؤثر غاز بقوة مقدارها F بوحدة النيوتن (N) على سطح مساحته المقطعية A بوحدة المتر المربع (m^2)، فإن ضغط الغاز P يُعطى بالعلاقة: $P = \frac{F}{A}$ وتُستخدم الباسكال (Pa) كوحدة لقياس الضغط.

! لإيجاد ضغط غاز محبوس داخل وعاء بواسطة مكبس، نستخدم اتزان القوى المؤثرة على المكبس.

! قانون بويل–شارل: بالنسبة إلى كمية ثابتة من الغاز، فإن الحجم V يتناسب عكسيًّا مع الضغط P، ويتناسب طرديًّا مع درجة الحرارة المطلقة T، ولذلك: ثابت = $\frac{PV}{T}$

! يُسمى الغاز الذي يمكن إهمال حجم جزيئاته والقوى بين جزيئاته غازًا مثاليًّا (Ideal gas). وفي الغاز المثالي، ينطبق قانون بويل–شارل بصورة دقيقة .

ملاحظة:

درجة الحرارة المطلقة T (K)

= درجة الحرارة السيليزية T_c + 273.

يجب التحويل إلى الكلفن قبل استخدام PV/T.

صندوق المعادلات:

الكمية أو القانون	العلاقة
الضغط	$P = F/A$، (وحدة القياس $Pa = N/m^2$)
اتزان المكبس	$PA - PoA - mg = 0$ $P = Po + mg/A$
قانون بويل – شارل	$P_1V_1/T_1 = P_2V_2/T_2$ PV/T = constant = ثابت

مثال محلول:

أعطِ كل إجابة لأقرب رقمين عشريين.

الموقف:	(أ) حُبس هواء في وعاء أسطواني بمكبس أملس الحركة مساحة مقطعه $4.9 \times 10^{-3}\ m^2$ وكتلته 10 kg. أوجد ضغط الهواء داخل الوعاء بوحدة Pa، إذا كان الضغط الجوي 1.0×10^5 Pa وعجلة الجاذبية $9.8\ m/sec^2$. (ب) تغيرت حالة غاز مثالي من 19°C و9.6×10^5 Pa وحجم 3.5 L إلى ضغط 1.2×10^5 Pa وحجم 3.2 L . أوجد درجة حرارته النهائية بالدرجة السيليزية. (جـ) سُخّن غاز حجمه $0.60\ m^3$ ودرجة حرارته 280 K إلى 420 K مع ثبوت الضغط. أوجد حجمه النهائي.
المعطيات والمطلوب:	(أ) $A = 4.9 \times 10^{-3}\ m^2$ ، و $m = 10\ kg$، و$Po = 1.0 \times 10^5\ Pa$، و $g = 9.8\ m/sec^2$؛ والمطلوب P. (ب) الحالة الأولى: $T_1 = 19\ ^\circ C$ و $P_1 = 9.6 \times 10^5\ Pa$، و$V_1 = 3.5\ L$ الحالة الثانية: $P_2 = 1.2 \times 10^5\ Pa$، و$V_2 = 3.2\ L$؛ والمطلوب T_2 بالدرجة السيليزية. (جـ) $V_1 = 0.60\ m^3$، و$T_1 = 280\ K$، و$T_2 = 420\ K$، والضغط ثابت؛ والمطلوب V_2.

التمثيل:	**يوضح الشكل 4-1-1 ترتيب المسألة** (ا) هواء محصور بمكبس أملس كتلته 10 kg، بينما يوضح الشكل 3-1-1 اتزان القوى على المكبس. وفي المسألتين (ب) و(جـ) ارسم الغاز قبل تغير الحالة وبعده، ودوّن P وV وT في كل حالة.
الاستراتيجية:	نكتب معادلة اتزان القوى على المكبس لإيجاد الضغط. وعند تغير حالة الغاز نستخدم ثابت = PV/T قبل التغير وبعده، ونحوّل درجة الحرارة دائمًا إلى درجة الحرارة المطلقة.
الحل الموضح:	(ا) من اتزان القوى $PA - P_0A - mg = 0$، ومنه: $P = P_0 + mg/A = (1.0 \times 10^5) + (10 \times 9.8)/(4.9 \times 10^{-3}) = 1.0 \times 10^5 + 2.0 \times 10^4 = 1.2 \times 10^5$ Pa. (ب) لتكن درجة الحرارة المطلوبة T بالكلفن. من قانون بويل–شارل، مع استخدام درجة الحرارة المطلقة: $(9.6 \times 10^5 \times 3.5)/(19 + 273) = (1.2 \times 10^5 \times 3.2)/T$ $T = [1.2 \times 10^5 \times 3.2 \times (19 + 273)]/[9.6 \times 10^5 \times 3.5] = 33.37K... \approx 33$ K $T_c = 33 - 273 = -240$ °C (جـ) عند ثبوت الضغط: $P \times 0.60 / 280 = PV / 420$، ومنه $V = (0.60/280) \times 420 = 0.90$ m^3
منطقية الحل:	(ا) أضاف وزن المكبس 2×10^4 Pa، أي نحو خُمس الضغط الجوي، ولذلك تكون الزيادة البسيطة فوق 1.0×10^5 Pa معقولة. (ب) انخفض الضغط بشدة مع تغير صغير في الحجم، ولذلك يجب أن تنخفض درجة الحرارة إلى ما دون 0°C بكثير؛ فتناسب النتيجة السالبة الكبيرة المعطيات. (جـ) زادت درجة الحرارة من 280 K إلى 420 K بمعامل 1.5؛ لذا $0.60 \times 1.5 = 0.90$ m^3.
فسِّرها بنفسك:	اذكر في جملة واحدة لماذا ترفع كتلة المكبس ضغط الغاز فوق الضغط الجوي، ولماذا يجب استخدام الكلفن قبل التعويض.

حاول بنفسك: غاز مثالي عند درجة حرارة 27 °C وضغط 1.0×10^5 Pa وحجم 2.0 L، سُخّن عند ضغط ثابت إلى 87 °C. أوجد حجمه الجديد.

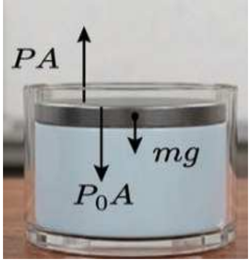
حاول:

١. أعطِ الإجابة لأقرب رقمين عشريين. حُبس هواء بمكبس أملس مساحة مقطعه 4.9×10^{-2} m^2 وكتلته 50 kg. أوجد ضغط الهواء بوحدة Pa، إذا كان الضغط الجوي 1.0×10^5 Pa وعجلة الجاذبية 9.8 m/s^2.

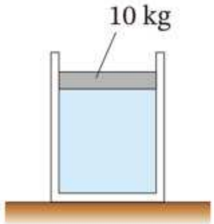
٢. تغير غاز مثالي من درجة حرارة 27 °C و ضغط 1.5×10^5 Pa وحجم 0.60 m^3 إلى 127 °C وحجم 0.20 m^3. أوجد ضغطه النهائي.

٣. غاز ضغطه 2.0×10^5 Pa وحجمه 0.44 m^3 ضُغط إلى 2.2×10^5 Pa عند ثبوت درجة الحرارة. أوجد حجمه النهائي.

٤. غاز حجمه 1.0 m^3 ودرجة حرارته 300 K سُخّن إلى 360 K عند ثبوت الضغط. أوجد حجمه النهائي.



شكل (5.1.1): مخطط جسم حر للمكبس؛ يدفع الغاز المكبس إلى أعلى بقوة PA، بينما يؤثر الضغط الجوي إلى أسفل بقوة P_0A ويؤثر وزن المكبس إلى أسفل بقوة mg. في الشكل كتلة المكبس 10 kg.

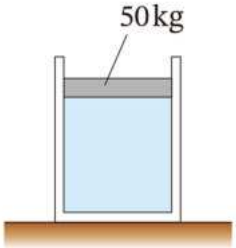


شكل (6.1.1): هواء محبوس داخل أسطوانة بمكبس أملس الحركة كتلته 10 kg.

قبل التغير (Before change)
الضغط بوحدة الباسكال — p [Pa]
الحجم — $V = 0.60$ m^3
درجة الحرارة المطلقة — $T = 280$ K

↓

بعد التغير (After change)
الضغط بوحدة الباسكال — p [Pa]
الحجم — V [m^3] *
درجة الحرارة المطلقة — $T = 420$ K
الشكل 6-1-1 — مثال محلول (c):
الغاز قبل وبعد تسخينه عند ضغط ثابت



هواء محبوس داخل أسطوانة بواسطة مكبس يتحرك بسلاسة، مساحة مقطعه العرضي: 4.9×10^{-2} وكتلته 50 كجم.

في سياق جديد

ينطلق منطاد أرصاد جوية (بالون الطقس) حاملًا كتلة ثابتة من الهيليوم. ومع ارتفاعه ينخفض ضغط الهواء الخارجي وتنخفض درجة حرارة الهواء، ومع ذلك يظل الغاز خاضعًا للعلاقة PV/T = constant. ولأن الضغط ينخفض أسرع كثيرًا من انخفاض درجة الحرارة، ينتفخ المنطاد حتى يصل قرب أقصى ارتفاع إلى أضعاف حجمه عند الإطلاق؛ وهذا هو السبب في أنه لا يُملأ إلا بشكل غير محكم عند السطح.

منطاد أرصاد جوية يظهر لحظة إطلاقه، صغيرًا ومنكمشًا، ثم يظهر مرة أخرى في طبقات الغلاف الجوي العلوي الذي يزداد ظلامًا، حيث يؤدي انخفاض الضغط الخارجي إلى تمدد الغاز المحبوس بداخله ليتحول إلى كرة كبيرة مشدودة، بينما تظل مجموعة الأجهزة المعلقة كما هي دون تغيير في الحجم.

دورك الآن: يحتوي منطاد قرب سطح الأرض على $5.0\ m^3$ من الغاز عند ضغط $1.0 \times 10^5\ Pa$ ودرجة حرارة $300\ K$ وعند ارتفاع كبير يصبح الضغط $2.5 \times 10^4\ Pa$ ودرجة الحرارة $250\ K$.
استخدم $PV/T = constant$ لتقدير الحجم الجديد.

طبيعة العلم:

من الأصل: فقاعات تصعد من أعماق البحر وقانون بويل.

تكبر فقاعات الهواء التي يطلقها الغواص كلما صعدت نحو السطح. فمع انخفاض عمق الماء يقل الضغط المحيط، ولذلك يزداد حجم الغاز بنسبة عكسية مع الضغط. وهكذا يمكن وصف خواص الغاز غير المرئية بقانون فيزيائي.

يُصاغ قانون بويل–شارل للغاز المثالي الذي تُهمَل فيه أحجام الجزيئات وقوى التجاذب بينها. وهذه المثالية نموذج علمي: فهي لا تتحقق تمامًا في أي غاز حقيقي، لكنها تتنبأ بسلوك الغاز الحقيقي بدقة كافية، كما تفشل في اتجاه معلوم عند الضغوط العالية جدًّا أو درجات الحرارة المنخفضة جدًا. وتُقاس جودة النموذج بقدرته الصادقة على التنبؤ، لا بكونه مطابقًا للواقع في كل حالة.

دورك الآن: اقترح موقفًا يوميًّا لا يتبع فيه الغاز الحقيقي قانون الغاز المثالي بدقة، واذكر أي افتراض من افتراضات النموذج لا يتحقق.

شكل (7.1.1): تكبر فقاعات الهواء التي يطلقها الغواص في أثناء صعودها؛ لأن ضغط الماء المحيط يقل مع تناقص العمق.

سؤال الدرس، وإجابته:

ترتبط قيم الضغط والحجم ودرجة الحرارة المطلقة لكتلة ثابتة من الغاز المثالي بالعلاقة $P V / T =$ ثابت؛ زيادة الضغط عند ثبوت درجة الحرارة يؤدى إلى تناقص الحجم، وزيادة درجة الحرارة المطلقة عند ثبوت الضغط تؤدى إلى زيادة الحجم.
والضغط نفسه قوة موزعة على وحدة المساحة $P = F / A$، ولذلك يضيف وزن المكبس مقدار mg / A إلى الضغط الجوي المؤثر في الغاز المحبوس.

تمرين:

١. أعطِ الإجابة لأقرب رقمين عشريين. حُبس هواء بمكبس أملس مساحة مقطعه $4.9 \times 10^{-3}\ m^2$ وكتلته $20\ kg$. أوجد ضغط الهواء داخل الوعاء إذا كان الضغط الجوي $1.0 \times 10^5\ Pa$ وعجلة الجاذبية $9.8\ m/s^2$.

٢. حُبس هواء في وعاء أسطواني بمكبس أملس مساحة مقطعه $1.0\ cm^2$. إذا دُفع المكبس بقوة $40\ N$، فأوجد ضغط الهواء داخل الوعاء، مع اعتبار الضغط الجوي $1.0 \times 10^5\ Pa$..

٣. تغير غاز مثالي من $27\ ^oC$ وضغط $2.0 \times 10^5\ Pa$ وحجم $3.0 \times 10^{-2}\ m^3$ إلى $87\ ^oC$ وضغط $1.0 \times 10^5\ Pa$. أوجد حجمه النهائي.

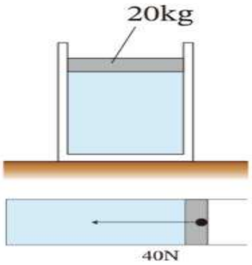
٤. تغير غاز مثالي من $77\ ^oC$ وضغط $3.0 \times 10^5\ Pa$ وحجم $500\ mL$ إلى $47\ ^oC$ وحجم $2.0L$ أوجد ضغطه النهائي.

٥. غاز ضغطه $1.0 \times 10^5\ Pa$ وحجمه $0.80\ m^3$، تغير حجمه إلى $0.40\ m^3$ عند ثبوت درجة الحرارة. أوجد ضغطه النهائي.

٦. غاز ضغطه $2.0 \times 10^5\ Pa$ وحجمه $3.0 \times 10^{-2}\ m^3$، تغير ضغطه إلى $1.0 \times 10^5\ Pa$ عند ثبوت درجة الحرارة. أوجد حجمه النهائي.

٧. غاز حجمه $1.1 \times 10^{-2}\ m^3$ ودرجة حرارته $330\ K$، بُرّد إلى $300\ K$ عند ثبوت الضغط. أوجد حجمه النهائي.

٨. غاز حجمه $3.0 \times 10^{-2}\ m^3$ ودرجة حرارته $300\ K$، بُرّد إلى $200\ K$ عند ثبوت الضغط. أوجد حجمه النهائي.



شكل (8.1.1)

١-٢ — معادلة الحالة للغاز المثالي (قانون الغاز المثالي) (القانون العام للغازات)

؟ سؤال الدرس:

ما العلاقة التي تربط بين كل من ضغط الغاز وحجمه ودرجة حرارته وكمية مادته، أي عدد مولاته؟

ستتعلم أن:

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. تذكر أن عدد أفوجادرو (N_A) يساوي 6.02×10^{23} جسيمًا يمثل مولًا واحدًا (mol)، ويستخدم عدد أفوجادرو للربط بين عدد المولات وعدد الجزيئات.

٢. تطبق معادلة الحالة للغاز المثالي (القانون العام للغازات) $PV = nRT$، (حيث R يمثل الثابت العام للغازات $\approx 8.3\ \text{J/mol·K}$).

٣. تعوّض بالضغط بوحدة Pa، والحجم بوحدة m^3، ودرجة الحرارة المطلقة بوحدة K، لإيجاد أي مجهول من P وV وT وn.

الفكرة الرئيسية:

الغاز المثالي — هو الغاز الذي يخضع لمعادلة الحالة $PV = nRT$ بدقة تامة عند كل ضغط ودرجة حرارة.

الظاهرة — توقّع قبل أن تستمر

يمكن لأسطوانة هيليوم واحدة أن تملأ عددًا كبيرًا من بالونات الحفل قبل أن تنفد. فمن حجم الأسطوانة وضغط الغاز ودرجة حرارته يمكن حساب كمية الغاز المحبوسة داخلها، ومن ثم تقدير عدد البالونات المتبقية ؛ لأن الضغط والحجم ودرجة الحرارة وكمية المادة بالمولات ترتبط بعلاقة واحدة. ولا يتوقف ذلك على كون الغاز هيليوم ؛ فمول واحد من أي غاز مثالي يخضع لنفس العلاقة.

الفكرة الرئيسية:

كمية المادة n: هي كمية الغاز التي تقاس بالمولات (mol) وليس بالجرامات. كيف ترتبط كمية المادة n، بكل من الضغط P والحجم V ودرجة الحرارة T.

كم عدد البالونات؟

شكل (1.2.1): تملأ أسطوانة هيليوم واحدة عددًا كبيرًا من بالونات الحفل؛ لأن قيم الضغط والحجم ودرجة الحرارة تحدد كمية الغاز بالمولات داخلها.

تنبأ:

(أ) لملء ضعف الحجم عند نفس الضغط ودرجة الحرارة (ثبوت كل من الضغط ودرجة الحرارة)، هل نحتاج إلى كمية مادة أكبر أم أقل أم مساوية ؟

(ب) في وعاء صلب (ثابت الحجم) عند درجة حرارة ثابتة، إذا كانت قراءة الضغط أعلى، فهل توجد داخله كمية مادة أكبر أم أقل أم مساوية ؟

استكشف — قارن حركة عملتين

ما ستفعله: سخّن عينة ثابتة من الهواء المحبوس في دورق صلب، وتتبّع زيادة الضغط ودرجة الحرارة معًا، ثم اختبر ثبوت الكمية $\frac{PV}{T}$.

الزمن: 15 دقائق

ما تحتاجه (الأدوات): • دورق صلب محكم معلوم الحجم L [V] • مقياس ضغط (مانومتر) • ترمومتر • حمام مائي

حمام مائي

ترمومتر

مقياس الضغط

دورق صلب

الخطوات:

١ سجّل الحجم الداخلي الثابت للدورق V مرة واحدة بوحدة m^3؛ لأنه لا يتغير في جميع المحاولات.

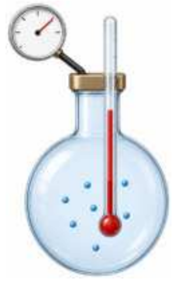
٢ عند درجة حرارة الغرفة اقرأ الضغط P بواسطة مقياس الضغط (المانومتر) ودرجة الحرارة T °C، ثم احسب درجة الحرارة المطلقة بالكلفن.

$$T\,K = T\,°C + 273$$

٣ ضع الدورق في الحمام المائي وسخنه برفق، وسجّل قيمًا جديدة لكل من P وT في كل خطوة مع ثبوت الحجم.

٤ احسب PV/T لكل محاولة وسجّلها في العمود الأخير.

المحاولة	درجة الحرارة T (K)	الضغط $P\ (KP_a)$	PV/T (J/K)
١			
٢			
٣			


شكل (2.2.1): دورق صلب محكم ثابت الحجم، مزود بمقياس ضغط وترمومتر.

حلّل ما جمعته:

(أ) عند تسخين الغاز مع ثبوت الحجم، كيف يتغير الضغط P ودرجة الحرارة المطلقة T معًا؟ وماذا تلاحظ في قيم PV/T بين المحاولات؟

(ب) تساوي الكمية V/TP المقدار nR، والثابت العام للغازات R واحد لجميع الغازات. فماذا يدل ثبوت V/TP على كمية المادة n داخل الدورق؟ اقسم قيمة العمود على R ≈ 8.3 J/mol·K لتتنبأ بعدد المولات.

ملاحظة القياس: استخدم دورقًا صلبًا لضمان ثبوت الحجم، وانتظر استقرار مقياس الضغط والترمومتر قبل كل قراءة، وحوّل كل درجة حرارة إلى الكلفن باستخدام $T_K = T_C + 273$

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الجزء التالي.

من الملاحظة إلى النموذج

المول وعدد أفوجادرو ، الجزيئات صغيرة جدًا وعددها كبير جدًا بحيث لا يمكننا عدّها واحدةً تلو الأخرى، لذلك نستخدم حزمًا (كميات) منها بدلًا من ذلك.

المول هو هذه الحزمة، وحجمها محدد بدقة. ويمكنك وزن عينة على ميزان عادي لمعرفة عدد المولات الموجودة فيها.

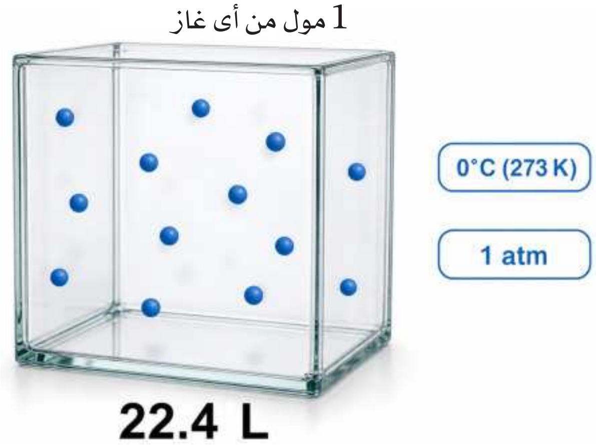
ثابت أفوجادرو N_A هو عامل التحويل بين المول وعدد الجزيئات؛ أي نضرب كمية المادة بالمولات في N_A للحصول على العدد الفعلي للجزيئات، ثم يمكننا القسمة عليه للعودة إلى عدد المولات.

ولهذا السبب تُكتب قوانين الغازات بوحدة المول؛ فهي الطريقة الوحيدة لتحويل عدد الجزيئات إلى عدد يمكن التعامل معه في المعادلات ويُعبِّر عن التجمعة التي تضم 6.02×10^{23} جسيمًا بمول واحد، ورمزه .mol. وتسمى الكمية المقاسة بالمول «كمية المادة». ويسمى العدد $\text{mol}/6.02 \times 10^{23}$ بعدد أفوجادرو (N_A). فالمول وحدة قياس لعدد هائل من الجزيئات في عينة الغاز.

الحالة القياسية ومعادلة الحالة

تسمى حالة الغاز عند $0\ °C$، أي $273K$، وضغط $1\ atm$ (يساوي الضغط الجوي) بالحالة القياسية. وفي هذه الحالة يشغل المول الواحد من أي غاز مثالي، بصرف النظر عن نوعه، حجمًا مقداره $22.4\ L$.

الغاز المثالي الذي كمية مادته $n\ [mol]$ وضغطه $P\ [Pa]$ وحجمه $V\ [m^3]$ ودرجة حرارته $T\ [K]$ يخضع للعلاقة $PV = nRT$. وتسمى معادلة الحالة للغاز المثالي. وR هو الثابت العام للغازات، وقيمته التقريبية $8.3/J\ (mol \cdot K)$ لجميع الغازات.



شكل (3.2.1): يشغل مول واحد من أي غاز مثالي حجم $22.4\ L$ في الحالة القياسية عند $0°C$ وضغط $1\ atm$.

نقطة

- يمثل 6.02×10^{23} جسيمًا مولًا واحدًا، ويسمى عدد الجسيمات في المول بعدد أفوجادرو (N_A).
- تُسمى حالة الغاز عند درجة حرارة $0\ °C$ (أي $273K$) وضغط $1atm$ بـالحالة القياسية (standard state).
- في الحالة القياسية، وبغض النظر عن نوع الغاز، فإن حجم الغاز لكل $1mol$ يساوي $22.4\ L$ ويخضع الغاز المثالي لمعادلة الحالة $PV = nRT$ (حيث R يمثل الثابت العام لجميع الغازات $\approx (8.3\ J/(mol \cdot K))$. ويجب التعويض بالضغط بوحدة Pa والحجم بوحدة m^3 ودرجة الحرارة المطلقة بالكلفن K.

صندوق المعادلات:

معادلة الحالة (القانون العام للغازات)	$PV = nRT$؛ P بوحدة Pa، وV بوحدة m^3، وT بوحدة K، وn بوحدة mol
الثابت العام للغازات	$R \approx 8.3\ J/mol \cdot K$ حيث يمثل الثابت العام لجميع الغازات
الحجم المولي القياسي درجة الحرارة	يشغل مول واحد من أي غاز مثالي حجم $22.4\ L$ في الحالة القياسية عند $0°C$ وضغط $1\ atm$ $T_K = 0\ C + 273$

حقيقة أساسية

المول الواحد يضم 6.02×10^{23} جسيمًا، وعدد أفوجادرو $N_A = 6.02 \times 10^{23}\ /mol$.

مصطلح

كمية المادة هي كمية العينة المقاسة بالمولات، وتعبّر عن عدد الجزيئات الموجودة.

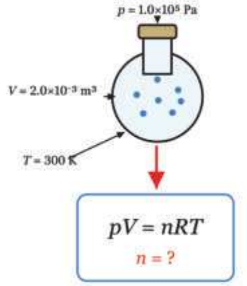
ملاحظة

يوجد أكثر من حالة مرجعية مستخدمة؛ ففي الكيمياء غالبًا ما تُستخدم درجة حرارة $25°C$ بدلًا من $0°C$، وكل حالة منها تعطي حجمًا موليًا مختلفًا.

لذلك، تحقق من الحالة المرجعية المقصودة في السؤال قبل أن تستخدم القيمة $22.4\ L$.

مثال محلول:

الموقف:	أوجد كمية المادة بالمولات لغاز مثالي ضغطه 1.0×10^5 Pa ودرجة حرارته 27 °C وحجمه 2.0×10^{-3} m^3 لأقرب رقمين عشريين، علمًا بأن $R = 8.3$ J/(mol·K).
المعطيات والمطلوب:	$P = 1.0 \times 10^5$ Pa، و$T = 27 + 273 = 300$ K، و$V = 2.0 \times 10^{-3}$ m^3، و$R = 8.3$ J/(mol·K)؛ والمطلوب n.
التمثيل:	العينة في حالة واحدة تحددها القيم P وV وT. انظر الشكل 1-2-2 الدورق ومقياس الضغط والترمومتر التي توفر القراءات الثلاث
الاستراتيجية:	تطبيق معادلة الغاز المثالي (القانون العام للغازات)، نتحقق من وحدات قياس الضغط والحجم ودرجة الحرارة المطلقة وعدد المولات، ثم نعوّض في PV = nRT لإيجاد المجهول.
الحل الموضح:	$(1.0 \times 10^5) \times (2.0 \times 10^{-3}) = n \times 8.3 \times (27 + 273)$ $200 = n \times 8.3 \times 300 = n \times 2490$ $n = 200/2490 = 8.0 \times 10^{-2}$ mol.
منطقية الحل:	عند 0 °C و1 atm يشغل المول 22.4 L والحجم هنا 2.0 L فقط والضغط قريب من 1 atm؛ لذلك نتوقع كمية أقل كثيرًا من مول واحد، وتلائم النتيجة 8.0×10^{-2} mol هذا التوقع.
فسّرها بنفسك:	لماذا يجب تحويل درجة الحرارة السيليزية إلى الكلفن قبل التعويض في PV = nRT؟



وصف شكل (4.2.1): تُعوض القيم المعلومة P وV وT في المعادلة PV = nRT لإيجاد n.

حاول بنفسك:

أوجد كمية المادة لغاز مثالي ضغطه 1.0×10^5 Pa ودرجة حرارته 27 °C وحجمه 4.0×10^{-3} m^3 لأقرب رقمين عشريين، مع $R = 8.3$ J/(mol·K).

حاول:

١. حدد حجم غاز مثالي بوحدة m3 لأقرب رقمين عشريين إذا كان ضغطه 1.2×10^5 Pa ودرجة حرارته 373 K وكمية مادته 2.0 mol. . استخدم $R = 8.3$ J/(mol·K)

٢. حدد كمية المادة بالمولات لغاز مثالي ضغطه 1.7×10^5 Pa ودرجة حرارته 27 °C وحجمه 6.0×10^{-3} m^3 لأقرب رقمين عشريين. استخدم $R = 8.3$ J/(mol·K).

في سياق جديد

يحتوي خزان غوص صلب من الفولاذ على عينة ثابتة من الهواء. ولأن الجدار المعدني يثبت الحجم، تتيح معادلة PV = nRT للغواص استخدام قراءة الضغط والحجم ودرجة الحرارة لحساب عدد مولات الهواء المتبقية، ومن ثم تقدير عدد الأنفاس. ومع فراغ الخزان تقل n؛ وعند ثبوت V وT ينخفض الضغط P بنسبة تناسب كمية الغاز المتبقية.

أسطوانة غوص فولاذية صلبة ذات حجم ثابت تحتوي جزيئات هواء متقاربة عند ضغط مرتفع، بينما تكبر فقاعات هواء الزفير مع صعودها لانخفاض الضغط المحيط

دورك الآن: خزان صلب حجمه 1.2×10^{-2} m^3 يحتوي غازًا عند ضغط 8.31×10^6 Pa ودرجة حرارة 300 K. استخدم PV = nRT و$R = 8.3$ J /(mol·K).

احسب كمية المادة داخل الخزان.

طبيعة العلم:

من الأصل: العدد الهائل «عدد أفوجادرو». تمثل كمية المادة بالمولات التي تظهر في معادلة الغاز المثالي هى وحدة قياس لعدد جزيئات الغاز. ويسمى عدد الجزيئات في مول واحد بعدد أفوجادرو، وهو نحو 6.02×10^{23}. ويشغل الغاز المثالي في الحالة القياسية 22.4 L، أي ما يقارب حجم إحدى عشرة زجاجة بلاستيكية كبيرة، بصرف النظر عن نوع الغاز ويحتوي بداخله هذا العدد الفلكي من الجزيئات التي تتحرك في كل اتجاه.

وصف الشكل (5.2.1): نحو إحدى عشرة زجاجة بلاستيكية كبيرة تشغل الحجم نفسه، 22.4 L، الذي يشغله مول واحد من الغاز ويضم قرابة 6.02×10^{23} جزيئًا.

الثابت العام للغازات R قيمة واحدة تنطبق على كل الغازات. حيث تم قياسه على تفسير سلوك الأكسجين والهيليوم والهواء على حد سواء، تُعد سمة مميزة للنموذج الفيزيائي الجيد: فهو يلخص العديد من الملاحظات المنفصلة في علاقة واحدة $PV = nRT$؛ إذ يجمع ملاحظات كثيرة في علاقة قابلة للاختبار بقياسات جديدة.

دورك: اقترح طريقة لقياس عدد أفوجادرو أو الثابت العام للغازات R باستخدام قراءات يمكن إجراؤها في معمل المدرسة.

سؤال الدرس، وإجابته:

بالنسبة للغاز المثالي، ترتبط كل من الضغط والحجم ودرجة الحرارة وكمية المادة بمعادلة حالة واحدة هي $PV = nRT$، حيث $R \approx 8.3\ J/(mol\cdot K)$ وهي ثابتة بالنسبة لكل غاز. وتُحسب كمية المادة n بالمول، حيث يبلغ عدد الجزيئات 6.02×10^{23} جزيء في المول الواحد، وتكون أي واحدة من الكميات الأربع ثابتة بمجرد تحديد الثلاثة الأخرى.

كم عدد البالونات؟

المشهد الذي بدأنا به.

تمرين:

١. لأقرب رقمين عشريين حدد حجم غاز مثالي بوحدة m^3 إذا كان ضغطه 1.2×10^5 Pa ودرجة حرارته 27 °C وكمية مادته 2.0 mol، مع استخدام $R = 8.3\ J/(mol\cdot K)$.

٢. لأقرب رقمين عشريين حدد درجة حرارة غاز مثالي بالدرجة السيليزية إذا كان ضغطه 4.0×10^4 Pa وكمية مادته 0.50 mol وحجمه $3.32 \times 10^{-2}\ m^3$، مع استخدام $R = 8.3\ J/(mol\cdot K)$.

٣. لأقرب رقمين عشريين حدد كمية المادة بالمولات لغاز مثالي ضغطه 3.0×10^5 Pa ودرجة حرارته 127 °C وحجمه $1.66 \times 10^{-2}\ m^3$، مع استخدام $R = 8.3\ J/(mol\cdot K)$.

الدرس ١-٣ — حركة جزيئات الغاز

؟ سؤال الدرس:
من المنظور المجهري (من المنظور الميكروسكوبي)، كيف تولِّد حركة جزيئات الغاز ضغط الغاز؟

ستتعلم

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تحسب** الدفع الذي يؤثر به جزيء واحد على الجدار في تصادم مرن واحد، ومقداره $2mv_x$، وتحسب عدد مرات اصطدامه بالجدار نفسه.

٢. **تنتقل** من جزيء واحد إلى N من الجزيئات لاشتقاق متوسط القوة F والضغط P المؤثرين على الجدار.

٣. **تشتق** علاقة النظرية الحركية للغازات $P = Nmv^2/3V$، وتفسر بها المنشأ المجهري للضغط.

الظاهرة — تنبأ قبل أن تستمر

دع خيطًا رقيقًا من الدخان يدخل خلية زجاجية صغيرة، ثم راقبه بالمجهر. لا تستقر البقع المضيئة؛ بل تهتز وتندفع في مسارات عشوائية متقطعة، كأنها تُدفع من كل جانب. لا يلمسها شيء مرئي، وإنما تصدمها جزيئات الهواء المحيطة بها بصورة غير متساوية ومتواصلة. ونفس التأثير، حين يقع على جدار بدلًا من جسيم دخان، يتجمع ليكوّن الدفع المنتظم الذي نسميه الضغط.

الفكرة الرئيسية:
الدفع (Impulse): هو التغير في كمية حركة الجسم الذي يكتسبه، ويُقاس بوحدة نيوتن·ثانية N.sec.
يحتوي غاز على N جزيئًا، كتلة كل منها m، وتتحرك بسرعة v داخل حجم V.
فما مقدار التأثير الذي تشعر به جدران الوعاء نتيجة اصطدام هذه الجزيئات بها؟
ضغط الغاز هو النتيجة التراكمية لكثرة التصادمات الجزيئية التي لا تحصى؛ حيث يُحدث كل تصادم مع الجدار دفعًا ضئيلًا، ويُشكل مجموعُها المنتظم القوةَ التي نقوم بقياسها.

جسيمات الدخان في الهواء

شكل (1.3.1): جسيمات الدخان المرئية بالمجهر في حالة حركة مستمرة؛ فجزيئات الهواء تصطدم بها بشكل غير منتظم من كل جانب، وهذه التصادمات التي لا حصر لها، عندما تنتشر على جدار ما، تشكل الضغط.

تنبأ:

(أ) هل يؤثر جزيء واحد على الجدار طوال الوقت أم في لحظة التصادم فقط؟

(ب) إذا زادت عدد الجزيئات للضعف مع ثبوت سرعتها، فهل يتضاعف متوسط القوة على الجدار تقريبًا أم يقل للنصف أم يظل ثابتًا؟

استكشف — حبيبات في صندوق مهتز

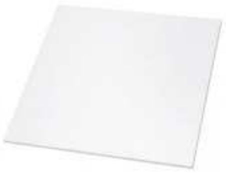
ما ستفعله: فكّر في نموذج ميكانيكي للغاز يتكوّن من حبيبات خرز كثيرة تهتز داخل صندوق، وتصطدم بجدار خفيف حر الانزلاق، لتعرف كيف تتجمع التصادمات المنفصلة في دفع منتظم نسميه الضغط.

الزمن: 8 دقيقة

ما تحتاجه:

- صندوق صغير شفاف وصلب
- بضع عشرات من الحبيبات المتماثلة (خرز)
- بطاقة خفيفة تنزلق بحرية لتكوّن أحد الجدران
- مسطرة

مسطرة


بطاقة انزلاق

خرز

صندوق شفاف

الخطوات:

١ تصوّر N خرزة (حبيبة) متماثلة، كتلة كل منها m، تتحرك في الصندوق وتصطدم بالجدار المنزلق بسرعة v. في كل تصادم مرن تنعكس حركة الخرزة، فتنقل إلى الجدار كمية حركة تقارب 2mv.

٢ فكر في عدد المرات التي تعود فيها الخرزة الواحدة إلى الجدار نفسه: فكلما زادت سرعة الخرزة، زادت سرعة إكمالها لدورتها ذهابًا وإيابًا، وبالتالي يزداد عدد تصادماتها في الثانية مع زيادة v.

٣ في كل حالة من حالات النموذج اضرب كمية الحركة لكل تصادم في عدد التصادمات في الثانية للحصول على متوسط القوة المؤثرة على الجدار، وأدخله في العمود الأخير.

٤ اقرأ قيمة العمود الأخير من أعلى إلى أسفل وقارن بين الحالات لترى كيف تتغير القوة مع زيادة عدد الخرز و مع زيادة سرعتها.

الحالات	كمية الحركة في التصادم الواحد التي تتناسب مع mv (α mv)	وعدد التصادمات في الثانية الذي يتناسب مع v (α v)	ومتوسط القوة الذي يتناسب مع Nmv^2. (αNmv^2)
N خرزة بسرعة v	دون حمل		
2N خرزة بسرعة v	كتلة واحدة		
N خرزة بسرعة 2v	كتلتان		

حلّل ما جمعته:

(أ) بالنظر إلى عمود القوة المتوسطة، كيف يؤثر مضاعفة عدد الخرز في الدفع؟ وكيف تؤثر مضاعفة السرعة؟ أي التغيرين أشد؟ ولماذا تزداد قوة التصادمات وتكرارها مع السرعة؟

(ب) يتصرف جدار الغاز الحقيقي بالطريقة نفسها. تنبأ كيف أن ضغط الغاز يعتمد على عدد الجزيئات N وعلى السرعة، ثم قارن تنبؤك بالعلاقة $P = \frac{Nmv^2}{3V}$

اكتب تفسيرك في سطرين قبل قراءة الجزء التالي.

ملاحظة توضيحية:

تلامس كل خرزة الجدار لجزء من الثانية فقط، ومع ذلك فإن الضربات (التصادمات) تتوالى بوتيرة عالية لدرجة أن الجدار يجعل الدفع يبدو أملس وثابتًا. المسار الثاني. هناك عاملان لكل جدار — شدة كل ضربة (كمية الحركة الذي تنقله) وتواتر الضربات (عدد الضربات في الثانية) — وناتج ضربهما يساوي متوسط القوة.

حقيقة أساسية:

الدفع = التغير في كمية الحركة.

حيث يؤدي تصادم مرن واحد إلى عكس اتجاه VX، مما يؤثر على الجدار بدفع مقداره 2 mvx بوحدة N·s.

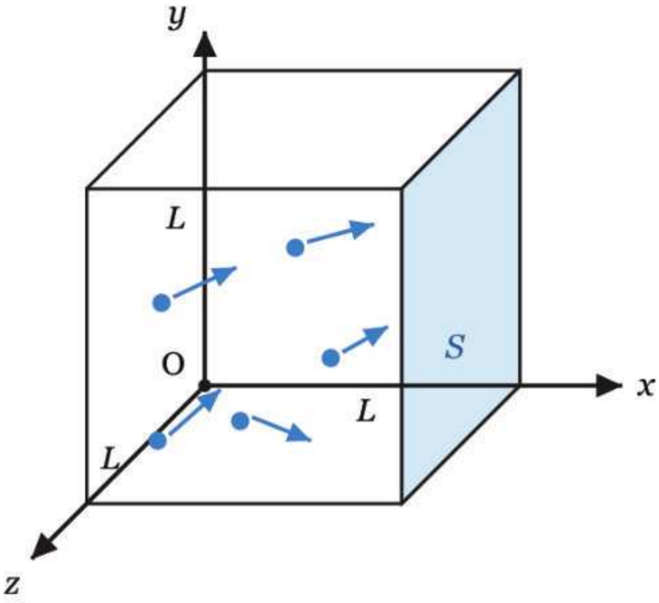
من الملاحظة إلى النموذج:

تصادم واحد يعطي دفعًا مقداره $2mv_x$:

لقد حددت تجاربك باستخدام حبات الخرز شكل الإجابة بالفعل: مضاعفة عدد حبات الخرز تضاعف الدفع، بينما مضاعفة السرعة تجعل الدفع أربعة أمثال قيمته؛ لأن الحبة الأسرع تصطدم بقوة أكبر وتعود في وقت أقصر.

ما ينقصنا الآن هو تحديد معامل التناسب، وهذا يتطلب متابعة حركة حبة واحدة خلال تصادم واحد.

نفترض غازًا مثاليًا عدد جزيئاته N جزيء، كتلة كل منها m، داخل وعاء مكعب طول ضلعه $L\ (m)$ وحجمه $V^3 = L\ (m^3)$. انظر إلى السطح A العمودي على محور x. ونظرًا لأن التصادم مع الجدار مرن، فإن مركبة السرعة (v_x) العمودية على الجدار فقط هي التي ينعكس اتجاهها: بالنسبة للمركبة x تتغير السرعة من v_x إلى $-v_x$. ويكون التغير في كمية حركة الجزيء في اتجاه x هو ΔP_x = $(-mv_x - mv_x = -2\,mv_x)$، لذا فإن الجدار يؤثر على الجزيء بدفع مقدار $2\,mv_x$. وبموجب قانون الفعل ورد الفعل (قانون نيوتن الثالث)، يُؤثر الجزيء على الجدار بدفع مقداره $2\,mv_x$ بوحدة N·s.



شكل (2.3.1): وعاء مكعب حرفه L ومحاوره x وy وz، والوجه المظلل A عمودي على محور x، وتتحرك جزيئات الغاز في اتجاهات مختلفة.

تصادمات عديدة تعطي قوة وضغطًا ثابتين(متوسطة):

يتحرك الجزيء ذهابًا وإيابًا على محور x بسرعة ثابتة v_x، ويقطع بين تصادمين متتاليين بالسطح A مسافة L2، لذلك يصطدم به مرة كل x $\frac{2L}{V_x}$ ثانية. وفي زمن t يكون عدد التصادمات $\frac{v_x t}{2L}$، ويكون الدفع الكلي $\frac{mv_x{}^2 t}{L}$. وبالقسمة على t يكون متوسط القوة من جزيء واحد،

$$F_{\text{جزيء}} = \frac{mv_x{}^2}{L}$$

في حالة المجموع N من الجزيئات فإن ذلك يؤدي إلى استبدال $v_x{}^2$ بمتوسطها $\overline{v_x{}^2}$، لذا فإن القوة المؤثرة على السطح A هي

$$F = \frac{Nm\overline{v_x{}^2}}{L}$$

حقيقة أساسية:

الدفع = التغير في كمية الحركة في تصادم مرن واحد، تنعكس مركبة السرعة v_x مما يجعل الجدار يكتسب دفعًا مقداره

؛ وحيث إن مساحة السطح هي **L2**، لذا فإن:

$$P = \frac{F}{L^2} = \frac{\frac{Nm\overline{v_x^2}}{L}}{L^2} = \frac{Nm\overline{v_x^2}}{L^3} = \frac{Nm\overline{v_x^2}}{V}$$

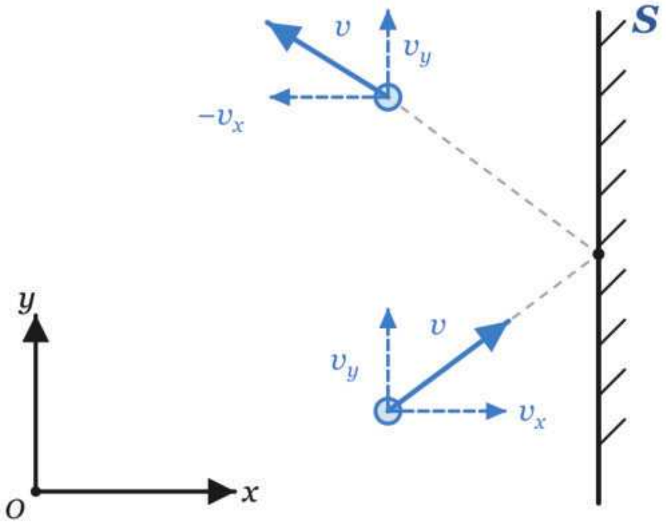
وحيث أن الحركة عشوائية (الجزيئات تتحرك فى جميع الاتجاهات) فلا يوجود اتجاه مفضل، لذا فإن المحاور الثلاثة (x، y، z) تحمل مساهمات متساوية، فإن متوسط مربع السرعة في الاتجاهات الثلاثة يكون متساويًا $\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}$، وبما أن مربع السرعة اللحظية لجزيء واحد يساوي مجموع مربعات مركبات سرعته على المحاور الثلاثة (حسب نظرية فيثاغورث):

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$$

فإن نصيب كل محور مثل (x) يساوي ثلث السرعة الكلية: $\overline{v_x^2} = \frac{\overline{v^2}}{3}$ وبالتعويض، نحصل على

$$P = \frac{Nm\overline{v_x^2}}{3V}$$

من العلاقة السابقة نجد أن ضغط الغاز على سطح ما يعتمد على عدد الجزيئات الموجودة، وكتلة كل منها، ومربع متوسط سرعة حركتها، ولا شيء غير ذلك. لا يعتمد على مساحة الوجه الذي نظرنا إليه، ولا شكل الصندوق.



شكل (3.3.1): في التصادم المرن ينعكس v_x الذى يمثل المركبة العمودية على السطح A بينما تظل v_y المركبة الموازية للسطح A.

مصطلح

متوسط مربع السرعة v^2 (Mean square speed) هو متوسط مربعات سرعات الجزيئات، وجذره التربيعي $\sqrt{v^2}$ يسمى السرعة الجذرية المتوسطة التربيع.

ملاحظة:

الحركة العشوائية ليس لها اتجاه مفضل، ولذلك:

$$\overline{v_z^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_x^2}$$

وكذلك:

$$\overline{v^2} = 3\,\overline{v_x^2}$$

نقطة

الخطوات اللازمة لتحديد الضغط من حركة جزيئات الغاز:

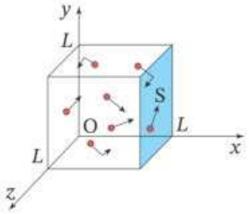
- حدد الدفع الذي تمارسه جزيئة واحدة على الجدار في تصادم واحد.
- حدد الدفع الكلي الذي يمارسه جزيئ واحد على الجدار خلال الزمن t.
- حدد متوسط القوة التي يؤثر بها جزىء واحد على الجدار.
- حدد متوسط القوة الكلية التي تؤثر بها الجزيئات N على الجدار.
- حدد ضغط الغاز.

صندوق المعادلات:

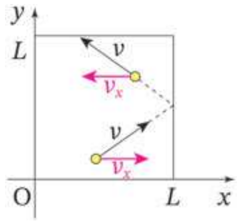
التصادم الواحد	الدفع على الجدار = $2mv_x$، ووحدته N·s.
جزيء واحد	عدد التصادمات في زمن t = $\frac{v_x t}{2L}$، ومنه F جزيء = $\frac{mv_x^2}{L}$
N جزيئًا	$F = \frac{Nm\overline{v_x^2}}{L}$ $F = \frac{Nm\overline{v_x^2}}{L}$، $P = \frac{F}{L^2} = \frac{Nm\overline{v_x^2}}{V}$
الضغط الحركي	$\overline{v_x^2} = \frac{\overline{v^2}}{3}$ $P = \frac{Nm\overline{v^2}}{3V}$ ووحدته Pa
الضغط بدلالة الكثافة ρ $\rho = \frac{Nm}{V}$	$P = \frac{Nm\overline{v^2}}{3V} = \frac{\rho\,\overline{v^2}}{3}$

مثال محلول — اشتقاق العلاقة:

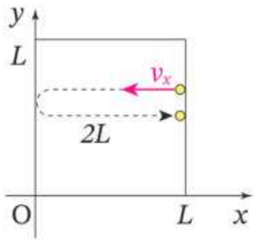
الموقف:	يملأ غاز مثالي مكوّن من N جزيء كتلة كل منها m وعاءً مكعبًا طول ضلعه L [m] وحجمه $V = L^3\ [m^3]$ باستخدام محاور الإحداثيات x, y, z، لنأخذ بعين الاعتبار الضغط الواقع على السطح A العمودي على المحور x لا تتصادم الجزيئات مع بعضها البعض، بل تتحرك في خطوط مستقيمة بسرعة ثابتة حتى تصطدم بالجدران؛ وتكون التصادمات مع الجدران مرنة تماماً، بحيث تظل السرعات دون تغيير. لنفرض أن لجزيء واحد سرعة v [m/s]، مركباتها v_x و v_y و v_z. (أ) أوجد مقدار الدفع المؤثر على السطح «A» نتيجة تصادم واحد مع جزيء واحد. (ب) أوجد مقدار الدفع المؤثر على السطح «A» من جزيء واحد خلال الفترة الزمنية [ثانية] «t». (جـ) أوجد متوسط القوة F (N) التي يؤثر بها جزيء واحد على السطح «A».. (د) أوجد متوسط القوة F (N) التي تؤثر على السطح A بواسطة N جزيئات، بافتراض أن متوسط v_x^2 يساوي $\overline{v_x^2}$. (هـ) عبّر عن الضغط P (Pa) بدلالة V (m³) ومتوسط مربع السرعات $\overline{v^2}$.
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** N، m، طول ضلع المكعب L، $V = L^3$، تصادمات مع جدران مرنة، مركبات السرعة v_x، v_y، v_z. **المطلوب:** (أ) الدفع لكل تصادم على A. (ب) الدفع على A خلال الزمن t. (جـ) F لجزيء واحد. (د) F الكلية لـ N جزيء باستخدام $\overline{v_x^2}$. (هـ) P معبّرًا عنه بـ V و $\overline{v^2}$.



شكل (1.3.4) مثال محلول: تتحرك جزيئات في مكعب طول ضلعه L؛ كل تصادم الجدار المظلل S يعكس المركبة *x* لكمية حرمة الجزيء الجزيء.

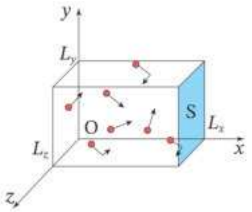


شكل (1.3.5) مثال محلول: يعبر جزيء صندوقًا طول ضلعه L ويرتد من الوجه عند L = *x*، بحيث تنعكس v_x، وتبقى السرعة v ثابتة.



شكل (1.3.6) مثال محلول: بين تصادمين على A يقطع الجزيء رحلة ذهاب وعودة مسافتها 2L ، لذا فإنه يضرب A مرة واحدة كل $2L/v_x$.

التمثيل:	انظر الشكل 1–3–2 للاطلاع على المكعب والسطح A، والشكل 1–3–3 للاطلاع على انعكاس v_x عند الجدار، والشكل 4-3-1 للاطلاع على المسار ذهابًا وإيابًا بطول 2 L على طول المحور x.
الاستراتيجية	اتبع الخطوات الخمس لحل المسألة بالترتيب، ولاحظ ما يحتاجه كل منها: * النبضة تنتج عن التغير في كمية الحركة. * معدل حدوث التصادمات يُحسب من مسافة الرحلة ذهابًا وإيابًا 2L. * الخطوة الأخيرة من تساوي الخواص (Isotropy) — أي أنه لا يوجد اتجاه مميز — تعطينا: لذلك $\overline{v_x^2} = 3\ \overline{v^2}$
الحل الموضح:	(أ) ينعكس v_x إلى $-v_x$، فيكون تغير كمية الحركة $-2mv_x$، وينقل الجزيء إلى A دفعًا موجب المقدار $2mv_x$ بوحدة قياس $N{\cdot}s$ (ب) الزمن بين تصادمين $2\,L/v_x$، وعدد التصادمات في زمن t يساوي $v_xt/(2\,L)$ $= 2m\,v_x \times v_xt/(2\,L) = mv_x^2t/L =$ الدفع الكلي (جـ) الدفع = $Ft =$ ، فإن $= mv_x^2/L =$ جزيءF (د) باستخدام متوسط $\overline{v_x^2}$ لذا فإن القوة المؤثرة على السطح A لجميع الجزيئات، هي $F_{كلية} = \frac{Nm\overline{v_x^2}}{L}$ (هـ) $P = \frac{F_{كلية}}{L^2} = \frac{Nm\overline{v_x^2}}{L^3} = \frac{Nm\overline{v_x^2}}{V}$ وحيث أن الحركة عشوائية (الجزيئات تتحرك في جميع الاتجاهات) فلا يوجد اتجاه مفضل، لذا فإن المحاور الثلاثة (x ، y ، z) تحمل مساهمات متساوية، فإن متوسط مربع السرعة في الاتجاهات الثلاثة يكون متساويًا $\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}$ فإن نصيب كل محور مثل (x) يساوي ثلث السرعة الكلية: $\overline{v_x^2} = \frac{\overline{v^2}}{3}$ ؛ وبالتعويض، نحصل على $P = \frac{Nm\overline{v^2}}{3V}$
منطقة الحل:	وحدة $2m\,v_x$ هي $N{\cdot}s = kg{\cdot}m/s$. ووحدة Nmv^2/V هي $kg{\cdot}(m/s)^2/m^3$ $N/m^2 = Pa$. ويزداد الضغط مع N ومع $\overline{v^2}$ ويقل مع زيادة V؛ وهو ما يتفق مع السلوك المتوقع.
فسّرها بنفسك:	لماذا يظهر العامل 1/3 في العلاقة $P = Nmv^2/(3V)$؟ أشر إلى الاتجاهات الثلاثة المتساوية.



شكل (7.3.1) محاولة 1: الاستنتاج ذاته في صندوق مستطيل ذي أضلاع Lx، Ly، Lz؛ مع الوجه A العمودي على المحور *x*.

حاول بنفسك: جزيء كتلته 5.0×10^{-26} kg ومركب سرعته في اتجاه محور (x) $v_x = 400$ m/s في داخل مكعب طول ضلعه 0.10 m.

أوجد:

(أ) الدفع الذي ينقله للسطح A في كل تصادم.

(ب) عدد المرات التي يصطدم فيها بالسطح A في الثانية.

(جـ) متوسط القوة التي تؤثر على السطح A.

حاول:

يملأ غاز مثالي مكوّن من N جزيء كتلة كل منها m صندوقًا مستطيلًا طول ضلعه $L_x\,[m]$, $L_y\,[m]$, $L_z\,[m]$ وحجمه $V = L_x \times L_y \times L_z\,[m^3]$ باستخدام محاور الإحداثيات x, y, z، لنأخذ بعين الاعتبار الضغط الواقع على السطح A العمودي على المحور x لا تتصادم الجزيئات مع بعضها البعض، بل تتحرك في خطوط مستقيمة بسرعة ثابتة حتى تصطدم بالجدران؛ وتكون التصادمات مع الجدران مرنة تماماً، بحيث تظل السرعات دون تغيير. لنفرض أن لجزيء واحد سرعة v [m/s]، مركباتها v_x و v_y و v_z.

(أ) أوجد مقدار الدفع المؤثر على السطح «A» نتيجة تصادم واحد مع جزيء واحد.

(ب) أوجد مقدار الدفع المؤثر على السطح «A» من جزيء واحد خلال الفترة الزمنية [ثانية] «t».

(جـ) أوجد متوسط القوة F (N) التي يؤثر بها جزيء واحد على السطح «A».

(د) أوجد متوسط القوة F (N) التي تؤثر على السطح A بواسطة N جزيئات، بافتراض أن متوسط v_x^2 يساوي $\overline{v_x^2}$. (أ) أوجد مقدار الدفع المؤثر على السطح «A» نتيجة تصادم واحد مع جزيء واحد.

(هـ) عبّر عن الضغط P (Pa) بدلالة V (m^3) ومتوسط مربع السرعات $\overline{v^2}$.

في سياق جديد

الهواء الذي يبدو ساكنًا في غرفتك ليس ساكنًا على الإطلاق: فجزيئاته تندفع بسرعة تقارب سرعة رصاصة البندقية — ويكفي رقمان يمكن لأي شخص قياسهما لإثبات ذلك. قم بوزن حجم معروف من الهواء للحصول على كثافته، التي تبلغ حوالي $\rho = 1.3 kg/m^3$ عند درجة حرارة الغرفة، واقرأ الضغط من مقياس الضغط الجوي، الذي يبلغ حوالي $P = 1.0 \times 10^5 Pa$. وبتعبير النتيجة الحركية $P = \frac{Nm\overline{v^2}}{3V}$ بدلالة تلك الكثافة، نحصل على $P = \frac{\rho\,\overline{v^2}}{3}$، لذا فإن هاتين القراءتين اليوميتين على نطاق واسع وحدهما تحددان سرعة الجسيمات الصغيرة جدًا بحيث لا يمكن رؤيتها.

شكل (5.3.1): تتحرك جزيئات الهواء كالرصاص بسرعة تقارب 500 m/s، وترتد مرنًا عن الجدار؛ وكل اصطدام يسهم في الضغط الكلي.

دورك الآن: استخدم $P = ⅓\,\rho v^2$ مع $\rho = 1.3\,kg/m^3$ و $P = 1.0 \times 10^5\,Pa$ **احسب الجذر التربيعي لمربع متوسط السرعة.**

طبيعة العلم:

من الأصل: جزيئات الغاز تتحرك كالرصاص.

إن ضغط الهواء الذي نشعر به ناتج عن تصادم عدد لا يحصى من الجزيئات باستمرار بالجدران. في درجة حرارة الغرفة، تبلغ السرعة المتوسطة لجزيئات الهواء مثل النيتروجين والأكسجين حوالي 500 m/s وهي أسرع من سرعة الصوت وتضاهي سرعة رصاصة مسدس. التقدير أعلاه، ×4.8 102 m/s ، هو الجذر التربيعي لمربع متوسط السرعة ، وهي من نفس رتبة هذا المتوسط، حيث يتم استنتاجها من النموذج الحركي، وهو تطابق مذهل بين صورة مجهرية (ميكروسكوبية) وقياس ماكروسكوبي. ويشكل هذا الاستنتاج سلسلة من الافتراضات المثالية: جزيئات تشبه النقاط، وعدم وجود تصادمات بين الجزيئات، وجدران مرنة تمامًا، ومتوسط سلس يحل محل العديد من التصادمات المنفصلة. لا شيء من ذلك صحيح تمامًا، عملية حسابية مستحيلة لتريليونات من التصادمات إلى معادلة واحدة واضحة تتنبأ بالضغوط الحقيقية بشكل جيد.

هكذا تعمل النظرية الحركية — فهي تربط الحركة غير المرئية للجزيئات بكمية يمكننا قياسها بمقياس.

طرح دانيال برنولي هذا الاستنتاج (البرهان) بالذات في عام 1738 — الضغط باعتباره ارتطامًا لجزيئات لا حصر لها — وظلت هذه الفكرة دون تغيير تقريبًا لأكثر من قرن، حتى أعاد كلوسيوس في عام 1857 وماكسويل في عام 1860 بناءها وجعلوها قابلة للحساب. يمكن أن يكون النموذج صحيحًا ويظل ينتظر مائة عام للحصول على الدليل الذي يجعله جديرًا بالثقة.

دورك: اقترح قياسًا واحدًا يمكنك إجراؤه على غاز حقيقي لاختبار صحة تنبؤ النموذج $P = \frac{Nmv^2}{3V}$، واذكر الافتراض الذي من المرجح أن يفشل.

سؤال الدرس، وإجابته:

المشهد الذى بدأنا به

ينشأ ضغط الغاز عن الحركة المستمرة والخطية للجزيئات التي تصطدم بجدران الوعاء وترتد بشكل مرن. ويولد كل تصادم دفعة صغيرة تبلغ $2\ mv_x$، وتكون هذه التصادمات متكررة لدرجة أنها — عند حساب متوسطها على عدد N من الجزيئات وفي جميع الاتجاهات — تعمل كقوة ثابتة لكل وحدة مساحة: $P = \frac{Nmv^2}{3V}$. والضغط هو التعبير الكلي عن سرعة الجزيئات.

تمرين:

١. يُوضع مول واحد من جزيئات غازذات كتلة m (كجم) في وعاء مكعب طول ضلعه L (m) وحجمه $V = L3(m3)$. لا تصطدم الجزيئات ببعضها بعضًا، بل تصطدم بشكل مرن بالأسطح. مع تحديد المحاور x و y و z، انظر الضغط على السطح A العمودي على المحور. x لنفترض أن مركبات السرعة لجزيء ما هي V_x، V_y، V_z. املأ كل فراغ بالتعبير المناسب

٢. في تصادم واحد مع السطح A ، تكون الدفع الذي يعطيه هذا الجزيء للسطح A هو (a)، و عدد المرات التي يصطدم فيها بالسطح A في الثانية الواحدة هو. (b) إذن، فإن إجمالي الدفع الذي يعطيه للسطح A في الثانية الواحدة هو. (c) لنفترض أن عدد أفوجادرو هو N_A وأن متوسط v_x^2 يساوي $\overline{v_x^2}$. إذن فإن الدفع الكلي الذي تعطيه جميع الجزيئات لـ A في الثانية هو (d).

٣. إذا كانت F هي متوسط القوة المؤثرة على A من جميع الجزيئات، فإن (e) = F، وباستخدام $\overline{v_x^2} = \frac{\overline{v^2}}{3}$، فإن ضغط الغاز هو (f) = P.

الدرس ١-٤ — الطاقة الداخلية للغاز

؟ سؤال الدرس:

ما العوامل التي تحدد الطاقة الداخلية المختزنة في غاز؟

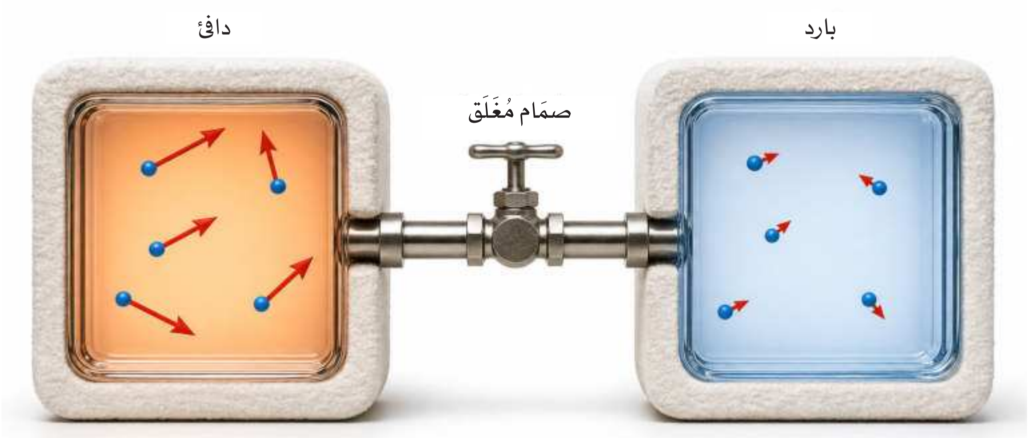
ستتعلم

١. **تحسب** كمية الطاقة في غازمثالي (أحادي الذرة)، بالجول (J)، بالاعتماد فقط على كمية الغاز ودرجة حرارته المطلقة.

٢. **حدد** كيف تتغير تلك الكمية المخزنة عند تسخين العينة نفسها أو تبريدها بمقدار محدد من درجات الكلفن.

٣. **تنبأ** بدرجة الحرارة والضغط النهائيين عند فتح وعاءين معزولين على بعضهما واختلاط الغازات الموجودة فيهما.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر



الفكرة الرئيسية:
الطاقة الداخلية U هي مجموع طاقة الحركة لجميع جزيئات الغاز وطاقة الوضع بين القوى الناشئة بين جزيئات الغاز،
وتُقاس بالجول (J)؛ وفي الغاز المثالي أحادي الذرة، تختفي هذه القوى، لذا الطاقة هي طاقة حركة.

تحتوي قارورتان صلبتان معزولتان حراريًا على كمية معينة من غاز أحادي الذرة وهو الهيليوم؛ إحداهما دافئة والأخرى باردة، وتتصل بينهما وصلة بها محبس مغلق. لا يمكن لأي شيء أن يدخل أو يخرج، ولا تتسرب أي حرارة عبر العازل. وعندما يُفتح الصمام، يختلط الغازان وتكون درجة حرارتهما واحدة. لم يتم استخدام موقد ولا ثلج — فقط الغاز موجود في القارورتين فقط.

تنبأ:

(أ) بعد فتح الصمام، هل تكون درجة الحرارة النهائية أعلى من درجة حرارة الغاز الدافئ، أم أقل من درجة حرارة الغاز البارد، أم بينهما؟

(ب) هل تزداد الطاقة الداخلية الكلية للغاز الموجود في القارورتين، أم تقل، أم تظل كما هي؟

استكشف — خلط الهواء الدافئ والبارد

ما ستفعله: اسمح للهواء الموجود في القارورتين المعزولتين عند درجتي حرارة مختلفتين بأن يختلط، ثم اختبرهل تساوي درجة الحرارة بعد الاتزان، واختبرما إذا كانت درجة الحرارة النهائية هي متوسط درجتي الحرارة في البداية — وهو دليل على حفظ الطاقة الداخلية.

الزمن: 15 دقيقة

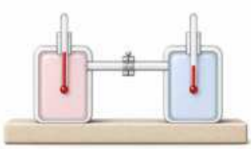
ما تحتاجه (الأدوات):

- قارورتان صلبتان معزولتان ومتماثلتان في الحجم (A) و(B)
- ترمومتران
- حمام ماء دافئ
- أنبوبة توصيل مزودة بغطاء (أوقفل) ولفافة عازلة حول الجهاز.

حمام مائي

ترمومتر

زجاجة عازلة


وصف الشكل 1-4-2: قارورتان معزولتان من الهواء المحبوس، A دافئة وB باردة، وفي كل منهما ترمومتر. تصل بينهما وصلة مثبتة بقفل فوق قاعدة رغوية، ويؤدي فتح القفل إلى اختلاط الغازين.

☆ ملاحظة القياس: اجعل مستودع كل ترمومترمعلقًا داخل الهواء المحبوس من دون أن يلامس الجدار الزجاجي، ولا تسجل القراءة إلا بعد توقفها عن التغير؛ فالقارورتان تصلان ببطء إلى قيمة ثابتة بسبب العزل.

الخطوات:

١ احبس كميتين متساويتين من الهواء في القارورتين الصلبتين المعزولتين، وثبّت ترمومترًا خلال سدادة كل قارورة، وسجّل قراءة درجة حرارة الغرفة في كل منهما.

٢ ضع القارورة A في حمام الماء الدافئ حتى تصبح قراءتها أعلى بوضوح من درجة حرارة الغرفة، واترك القارورة B باردة. سجّل درجتي الحرارة في البداية T_A و T_B

٣ لف القارورتين والأنبوب بالمادة العازلة، ثم افتح القفل وسجّل درجة الحرارة الواحدة T_{mix} التي تستقر عندها القارورتان. بعد ذلك احسب درجة حرارة المتوسط المتوقع $\frac{1}{2}(T_A + T_B)$

٤ كرر التجربة مع زيادة الفرق بين T_A و T_B

المحاولة	T_A °C دافئ	T_B °C بارد	T_{mix} °C بعد الاتزان	$\frac{1}{2}(T_A + T_B)$ °C
١				
٢				
٣				

حلّل ما جمعته:

(أ) من خلال المحاولات، كيف تقارن بين درجة الحرارة عند الاتزان Tmix ودرجة حرارة المتوسط المتوقع $\frac{1}{2}(T_A + T_B)$

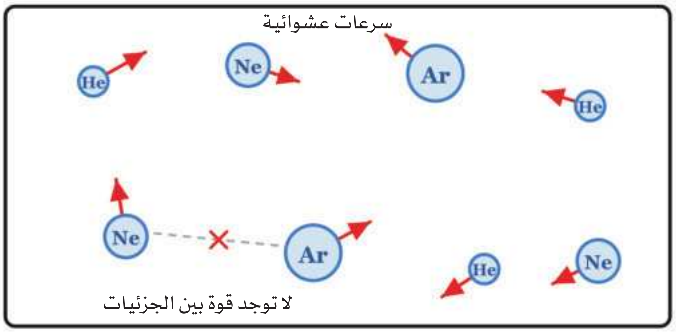
(ب) القارورتان صلبتان (الغاز لا يبذل شغلًا)، معزولتان (فلا تخرج منهما حرارة)، ماذا تخبرك هذه المقارنة عن الطاقة الداخلية الكلية للغازين، وأين ذهبت الطاقة التي فقدها الغاز الدافئ؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

أين يحتفظ الغاز بطاقته الداخلية

يمكن للغاز أن يخزن الطاقة في حالتين فقط. الأولى هي الحركة: فكل جزيء يتحرك بسرعة، وبالتالي يحمل طاقة حركة، وتزداد هذه الطاقة كلما ارتفعت درجة حرارة الغاز. والثانية هو الموضع: فالجزيئات تتجاذب عبر الفراغات الفاصلة بينها، ويؤدي تقريبها أو إبعادها عن بعضها إلى تغيير الطاقة المختزنة في هذا التجاذب، تمامًا كما يحدث عند إبعاد مغناطيس عن الحديد. وكلا الصورتين من الطاقة مرتبطة بالغاز ولا يمكن رؤية أي منهما من الخارج، ولهذا السبب يتم احتسابهما معًا ككمية حسابية واحدة. ويُعد الهيليوم والنيون والأرجون أبسط الحالات التي يمكن حسابها، لأن الذرة المنفردة لا تحتوي على روابط داخلية يمكن أن تتمدد، وفي الحالة المثالية، تكون الذرات المجاورة لها بعيدة جدًّا بحيث لا يمكن ملاحظة جاذبيتها.



وصف الشكل 3-4-1: ذرات منفردة من He وNe وAr تتحرك داخل صندوق في اتجاهات عشوائية وبسرعات عشوائية، ولا تؤثر بينها قوى بين جزيئية

استنتاج (2/3) — ولماذا لا يبقى أي شيء آخر

تتفق نتيجتان متوفرتان بالفعل. في الدرس 3-1، تم اشتقاق الضغط من التصادمات الجزيئية،

$$P = \frac{Nm\overline{v^2}}{3V}$$

والتي يمكن إعادة ترتيبها لتصبح

$$PV = \frac{Nm\overline{v^2}}{3}$$

أما معادلة الحالة (معادلة الغاز المثالي أو القانون العام للغازات) فتصف العينة نفسها من الخارج على أنها

$$PV = nRT$$

وبمساواة المعادلتين نحصل على

$$\frac{Nm\overline{v^2}}{3} = nRT$$

وبما أن طاقة الحركة الكلية للعينة تساوي

$$K.E = \frac{Nm\overline{v^2}}{2}$$

$$K.E = \frac{Nm\overline{v^2}}{3} = \frac{Nm\overline{v^2}}{3} \times \frac{3}{2} = \frac{3}{2}\,nRT = U$$

فالطاقة الداخلية لجزيئات الغاز لا تعتمد على الكتلة الجزيئية m، والسرعة v، والحجم، والخصائص الكيميائية للغاز (نوع الغاز أحادى الذرة). لذا فإن قاورتين من غازات مثالية أحادية الذرة مختلفة بنفس الكمية ونفس درجة الحرارة تحتفظان بنفس الطاقة، وتسخين عينة بمقدار ΔT هي نفسها مهما كان نوع الغاز.

مصطلح:

حينما يتوقف نموذج الذرة الأحادية: حينما يتوقف نموذج الذرة الأحادية — فإن الجزيء المكون من ذرتين مثل O_2 يمكنه أيضًا أن يدور حول محوره ويهتز على طول رابطته، وكل طريقة من هذه الطرق الإضافية للحركة تستهلك نصيبها الخاص من الطاقة. لذا فإن الغاز ثنائي الذرة أو متعدد الذرات يخزن طاقة أكثر مما تخزنه ذرة واحدة عند نفس درجة الحرارة، والعامل (3/2) في هذا الدرس لم يعد مناسبًا له. **حيث يتوقف الحد المثالي** — فالذرات الحقيقية تنجذب بعضها إلى بعض، لذا فإن نصيب الموضع لا يساوي صفرًا أبدًا. إذا ضغطت غازًا حقيقيًّا بقوة أو قمت بتبريده حتى يصبح سائلًا (عملية إسالة الغاز)، فإن الجزيئات تقضي وقتها قريبةً من بعضها: وعندئذٍ تعتمد الطاقة المختزنة على الحجم وكذلك على درجة الحرارة، ويكون الغاز في طريقه إلى التحول إلى سائل.

ماذا يحدث عندما لا يدخل أو يخرج أي شيء؟

ضع غازًا داخل جدران لا يمكن تحريكها ولا تسمح بمرور الحرارة — والجدار الذي لا يسمح بمرور الحرارة يُسمى جدارًا عازلًا للحرارة (أديباتيك)(adiabatic). لا يمكن لأي شيء أن يؤثر على هذا الحد الفاصل، لذا لا يوجد شغل مبذول ؛

ولا يمكن لأي شيء أن يتدفق عبر الجدار، لذا لا يسمح بمرور أي حرارة خلاله أيضًا. لا تصل الطاقة إلى الغاز المحبوس إلا في صورة حرارة أو شغل مبذول — وهذا ما يؤكده القانون الأول للديناميكا الحرارية، الموضح في الدرس 5–1 — لذا لم يعد هناك ما يُسجل في حساب طاقته. اربط بين وعائين من هذا النوع وستنطبق نفس الفكرة على كليهما في آن واحد: ما يفقده أحد الغازين يجب أن يكتسبه الآخر، لذا تُضاف الطاقتان ببساطة إلى القيمة التي كانتا عليها من قبل. وكتابة هذا المجموع مع وضع $3/2\,nRT$ أمام كل حد يسمح بشطب العامل المشترك، وتتضح أن درجة الحرارة النهائية هي متوسط درجتي الحرارة الابتدائيتين مرجحًا بعدد المولات التي جلبها كل وعاء — حيث تسحب العينة الأكبر النتيجة نحوها، وهو الحساب الذي تم إجراؤه في المثال المحلول.

نقطة

- ! تسمى الجزيئات المكوّنة من ذرة واحدة، مثل He وNe وAr، جزيئات أحادية الذرة.
- ! الطاقة الداخلية للغاز هي مجموع طاقات حركة الجزيئات وطاقة الوضع الناتجة عن القوى بين الجزيئات.
- ! في الغاز المثالي أحادي الذرة تنعدم القوى بين الجزيئات، ولذلك فإن الطاقة الداخلية للغاز هي ببساطة مجموع طاقاته الحركية.
- ! يعبر عن الطاقة الداخلية U (J) لكمية n (mol) من غاز مثالي أحادي الذرة عند درجة حرارة T(K) بالمعادلة الآتية:

$$U=\frac{3}{2}\,nRT$$ (حيث R تمثل الثابت العام للغازات)

بالإضافة لذلك

- ! يعبر عن التغير في الطاقة الداخلية ΔU (J) عندما تتغير درجة حرارة كمية معينة الغاز بمقدار ΔT(K) بالصيغة التالية:

$$\Delta U=\frac{3}{2}\,nR\,\Delta T$$

- ! وفقًا للقانون الأول للديناميكا الحرارية، بالنسبة لغاز محبوس في وعاء بحجم ثابت، وعندما لا يحدث تبادل حراري مع الوسط المحيط، تُحفظ الطاقة الداخلية للغاز.

صندوق المعادلات:

الطاقة الداخلية لغاز مثالي أحادي الذرة	$U=\frac{3}{2}\,nRT$ (حيث R تمثل الثابت العام للغازات)
التغير في الطاقة الداخلية:	$\Delta U=\frac{3}{2}\,nR\Delta T$
معادلة الحالة	$PV = nRT$
حفظ الطاقة عند الخلط الأديباتي	$\frac{3}{2}\,n_A RT_A+\frac{3}{2}\,n_B RT_B=\frac{3}{2}\,(n_A+n_B)RT$
الثابت العام للغازات	$R \approx 8.3$ J/(mol.K)

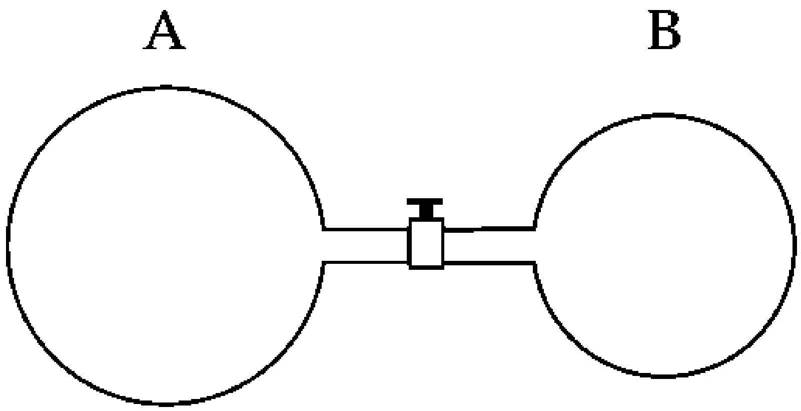
حقيقة أساسية:

القياس: كل مول واحد –عند درجة حرارة الغرفة (300 كلفن)– طاقةً مقدارها $(3/2)\times 1\times 8.3\times 300 \approx 3.7\times 10^3$ جول؛ وهو ما يعادل تقريباً الطاقة اللازمة لرفع كتلة قدرها 5 كجم إلى ارتفاع 75 متراً. وإذا خفّضت قيمة درجة الحرارة (بالكلفن) إلى النصف، فإنك تخفّض هذا المخزون من الطاقة إلى النصف أيضًا.

ملاحظة:

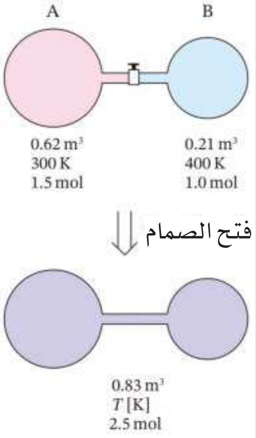
يمثل دائمًا الحرف T(K)، في معادلة الغاز المثالي درجة الحرارة المطلقة، لذا يجب تحويل القراءة بالدرجات المئوية (°C) قبل إدخالها في المعادلة. الاستثناء الوحيد هو الفرق: فارتفاع بمقدار 10 درجات مئوية يمثل ارتفاعًا بمقدار 10 كلفن، لذا يمكن أخذ ΔT مباشرةً من التغير بالدرجات المئوية.

مثال محلول:



الشكل 4-4-1 - مثال توضيحي: الوعاءان الاديباباين A، B متصلان بأنبوبة رفيعة مزودة بصمام مغلق

الموقف:	الموقف وعاء أديباتي A حجمه $0.62\ m^3$ ووعاء أديباتي B حجمه $0.21\ m^3$، يصل بينهما أنبوبة رفيعة بها صمام (محبس). والصمام مغلق، فيحتوي A على 1.5 mol من غاز مثالي أحادي الذرة عند 300 K، ويحتوي B على 1.0 mol من نفس الغاز عند 400 K. أجب لأقرب رقمين عشريين عن الحالة بعد فتح الصمام ومرور زمن كافٍ: (أ) أوجد درجة الحرارة النهائية بالكلفن. (ب) أوجد الضغط النهائي بالباسكال. خذ $R = 8.3\ J/(mol{\cdot}K)$.
المعطيات والمطلوب:	الوعاء: A $V_A = 0.62\ m^3$، و$n_A = 1.5\ mol$، و$T_A = 300\ K$. الوعاء: B $V_B = 0.21\ m^3$، و$n_B = 1.0\ mol$، و$T_B = 400\ K$. وثابت الغاز $R = 8.3\ J/(mol{\cdot}K)$. المطلوب: T درجة الحرارة النهائية وP الضغط النهائي
التمثيل:	يوضح الشكل 4-4-1 — الوعاءان A وB المتصلان بأنبوبة رفيعة بصمام مغلق — ويحتوي الشكل 1-4-5 على القيم التالية: الوعاان قبل الفتح، والغاز الخليط الذي يبلغ حجمه $0.83\ m^3$ ويحتوي على 2.5 mol عند درجة الحرارة T بعد الفتح.
الاستراتيجية:	الوعاءان أدياباتيان وصلبان، ولذلك يختلط الغازان مع حفظ مجموع الطاقة الداخلية. نساوي الطاقة الداخلية قبل الخلط وبعده لإيجاد T، ثم نطبق $PV = nRT$ على الحجم الكلي وكمية المادة الكلية لإيجاد P.



الشكل 1-4-5 - مثال توضيحي:
قبل فتح الصمام، كان الوعاءان ($0.62\ m^3$، 300 K، 1.5 mol و$0.21\ m^3$، 400 K، 1.0 mol)
والغاز الخليط بعد ذلك ($0.83\ m^3$، T، 2.5 mol)

الحل الموضح:	من حفظ الطاقة الداخلية $\frac{3}{2}\times 1.5\times 8.3\times 300+(3/2)\times 1.0\times 8.3\times 400=$ $\frac{3}{2}\times(1.5+1.0)\times 8.3\times T.$ يُختصر العامل المشترك $8.3\times(\frac{3}{2})$، فنحصل على: $(1.5\times 300)+(1.0\times 400)=2.5\times T.$ $T=3.4\times10^{2}\ K=340\ K.$ $850=2.5\ T$ من معادلة الغاز المثالي: $PV=nRT$ $P\times(0.62+0.21)=2.5\times 8.3\times(3.4\times10^{2}).$ $P=(2.5\times 8.3\times 340)\div 0.83=7055\div 0.83=8.5\times10^{3}\ Pa.$
منطقية الحل:	تقع 340 K بين 300 K و400 K، وهي أقرب إلى 300 K لأن الوعاء A يحتوي على كمية أكبر من الغاز: 1.5 mol مقابل 1.0 mol للوعاء B، وهذا يطابق المتوسط الموزون بعدد المولات. ومع انتشار 2.5 mol في $0.83\ m^3$ عند 340 K يكون الضغط قرابة 8.5×10^{3} Pa، وهو أقل بكثير من الضغط الجوي، بما يلائم غازًا منخفض الكثافة في حجم كبير.
فسِّرها بنفسك:	اذكر في جملة واحدة لماذا تكون درجة الحرارة النهائية أقرب إلى 300 K منها إلى 400 K، ولماذا يمكن اختصار العامل $R(\frac{3}{2})$ من طرفي معادلة اتزان الطاقة الداخلية.

حاول بنفسك: يحتوي الوعاء الأديباتي (عازل للحرارة) A، حجمه $0.50\ m^3$، على 2.0 mol من غاز مثالي أحادي الذرة عند 350 K، ويحتوي الوعاء الأديباتي (عازل للحرارة) B، حجمه $0.30\ m^3$، على 3.0 mol من الغاز نفسه عند 300 K. أوجد درجة الحرارة النهائية بعد فتح المحبس.

حاول:

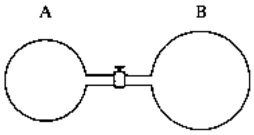
١) احسب الطاقة الداخلية بوحدة الجول لغاز مثالي أحادي الذرة عند 27 °C وكمية مادته 0.40 mol. خذ $R = 8.3\ J/(mol{\cdot}K)$، وأعط الإجابة لأقرب رقمين عشريين.

٢) حُبس 0.60 mol من غاز مثالي أحادي الذرة عند 400 K في وعاء أديباتي، ثم تغيرت درجة حرارته إلى 300 K. عيّن التغير في الطاقة الداخلية بالجول لأقرب رقمين عشريين. خذ $R = 8.3\ J/(mol{\cdot}K)$..

٣) وعاء أديباتي A حجمه $0.24\ m^3$ ووعاء أديباتي B حجمه $0.40\ m^3$ يصل بينهما أنبوبة رفيعة بها محبس. والمحبس مغلق، فيحتوي A على 2.0 mol من غاز مثالي أحادي الذرة عند 320 K، بينما B مفرغ. بعد فتح المحبس ومرور زمن كافٍ، لأقرب رقمين عشريين:

(أ) درجة حرارة الغاز بالكلفن.

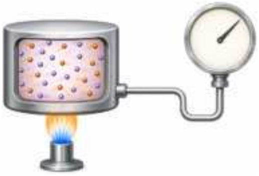
(ب) ضغط الغاز بالباسكال. خذ $R = 8.3\ J/(mol{\cdot}K)$.



الشكل 1-4-6 - مثال توضيحي: الوعاءان ($0.24\ m^3$) و($0.40\ m^3$) يصل بينهما أنبوبة رفيعة بها محبس

في سياق جديد — الهبوط عبر الرياح

لأن الطاقة الداخلية لغاز مثالي أحادي الذرة تعتمد فقط على درجة حرارته وكمية مادته، يعمل خزان صلب محكم يحتوي على هذا الغاز كمخزن للطاقة الحرارية. وإذا كان الخزان صلبًا فلا يبذل الغاز شغلًا عند تسخينه، وبحسب القانون الأول ترفع كل جول من الطاقة المزودة إليه طاقته الداخلية مباشرة: $\Delta U = \frac{3}{2} nR\Delta T$. ولهذا يستجيب ترمومتر الغاز ثابت الحجم بصورة منتظمة؛ فالطاقة الداخلية المختزنة ترتبط وحدها بدرجة الحرارة المطلقة.



الشكل 1-4-7: في ترمومتر غازي ثابت الحجم يؤدي تسخين الخزان الصلب المحكم إلى زيادة سرعة الجزيئات وارتفاع الضغط المبين على المقياس.

دورك الآن: يحتوي وعاء صلب معزول على $0.50\ \text{mol}$ من غاز مثالي أحادي الذرة. زادت طاقته الداخلية بمقدار $1.5 \times 10^3\ \text{J}$. استخدم: $\Delta U = \frac{3}{2} nR\Delta T$ و$R = 8.3\ \text{J/(mol·K)}$ لتقدير الزيادة في درجة الحرارة ΔT

طبيعة العلم

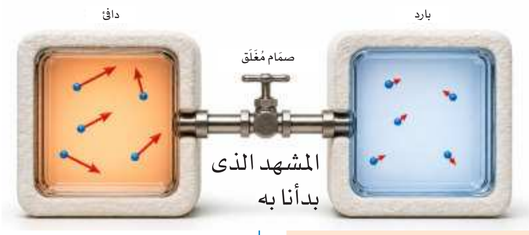
من الأصل - «الصفر المطلق»: أدنى درجة حرارة نهائية تتوقف عندها الحركة الحرارية. كلما انخفضت درجة حرارة الغاز الحركة الحرارية لجزيئاته أكثر هدوءًا وتناقصت الطاقة الداخلية. وإذا مددنا هذا الاتجاه بلا حد وصلنا إلى درجة حرارة يُفترض عندها أن تتوقف الحركة الحرارية للجزيئات تمامًا. وتسمى هذه الدرجة المنخفضة (النهائية) بالصفر المطلق، وتساوي $-273.15°\text{C}$ ويتخذ مقياس كلفن المطلق هذه النقطة مرجعًا له $0\ \text{K}$:

لاحظ أن الصفر المطلق يتم الوصول إليه من خلال توسيع نطاق النموذج، وليس عن طريق أي قياس: فلم تنجح أي تجربة على الإطلاق في تبريد المادة حتى الوصول إليه. وتشير العلاقة $U = (\frac{3}{2})\,nRT$ إلى نفس الحد، لأنها تتنبأ بأن الطاقة الداخلية ستنخفض إلى الصفر عند $T = 0$. ويمكن للنموذج الفيزيائي القوي أن يحدد حدًا يقع خارج نطاق كل التجارب، ومع ذلك يظل ينظم ما يمكننا قياسه.

دورك الآن: اقترح سببًا واحدًا يمنع تبريد غاز حقيقي فعليًا حتى الصفر المطلق، واذكر افتراضًا واحدًا من افتراضات نموذج الغاز المثالي ينهار عند الاقتراب من هذا الحد.

سؤال الدرس، وإجابته:

الطاقة الداخلية المختزنة في الغاز هي الطاقة الكلية لجزيئاته: طاقة حركتها مضافًا إليها طاقة الوضع الناتجة عن القوى بين الجزيئية. وفي الغاز المثالي أحادي الذرة تنعدم القوى بين الجزيئات، ولذلك تتحدد الطاقة المختزنة بالكامل بكمية المادة ودرجة الحرارة المطلقة وفق $U = (\frac{3}{2})\,nRT$. ويؤدي تغير درجة الحرارة إلى $\Delta U = (\frac{3}{2})nR\Delta T$، وتُحفظ هذه الطاقة في وعاء صلب أديباتي (عازل للحرارة).

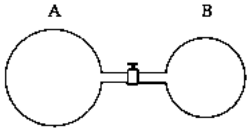


تمرين:

(أ) عيّن الطاقة الداخلية U بوحدة الجول لغاز مثالي أحادي الذرة عند درجة حرارة T_0 بوحدة الكلفن وكمية مادة n بوحدة المول، إذا كان الثابت العام للغازات R بوحدة J/(mol·K).

(ب) ما الطاقة الداخلية بوحدة الجول لغاز مثالي أحادي الذرة عند 27°C وكمية مادته 0.60 mol؟ خذ $R = 8.3$ J/(mol·K)، وأعط الإجابة لأقرب رقمين عشريين.

(جـ) حُبس 0.20 mol من غاز مثالي أحادي الذرة عند 100 K في وعاء أديباتي، ثم تغيرت درجة حرارته إلى 300 K. ما التغير في الطاقة الداخلية بوحدة الجول؟ خذ $R = 8.3$ J/(mol·K)، لأقرب رقمين عشريين.



الشكل – 8-4-1 تمرين 4:
الوعاءان ($0.62\ m^3$) و ($0.21\ m^3$) يصل بينهما أنبوبة رفيعة بها محبس

(د) وعاء أديباتي A حجمه $0.62\ m^3$ ووعاء أديباتي B حجمه $0.21\ m^3$ يصل بينهما أنبوبة رفيعة بها محبس مغلق. يحتوي A على 14 mol من غاز مثالي أحادي الذرة عند 300 K، ويحتوي B على 6.0 mol من الغاز عند 400 K. بعد فتح المحبس ومرور زمن طويل، أجب لأقرب رقمين عشريين:

١) ما درجة حرارة الغاز بالكلفن؟

٢) ما ضغط الغاز بالباسكال؟ خذ $R = 8.3$ J/(mol·K).

(د) وعاء أديباتي A حجمه V_1 بوحدة m^3 ووعاء أديباتي B حجمه V_2 بوحدة m^3. يصل بينهما أنبوبة رفيعة بها محبس مغلق يحتوي A على n_1 [mol] من غاز مثالي أحادي الذرة عند T_1 K. إذا كان ثابت الغاز R بوحدة J/(mol·K)، فعيّن درجة الحرارة T بالكلفن والضغط P بالباسكال بعد فتح المحبس ومرور زمن كافٍ في كل حالة.

١) كان الوعاء B مفرغًا قبل الفتح.

٢) كان الوعاء B يحتوي قبل الفتح على n_2 [mol] من غاز مثالي أحادي الذرة عند T_2[K].

الدرس ١-٥ — تغيرات حالة الغاز والحرارة والشغل

؟ سؤال الدرس:

كيف تتغير حالة الغاز عندما تُزوَّد إليه حرارة أو يُضغط؟

ستتعلم

١. **تحسب** طاقة الغاز المحبوس، مع التحويل بين الكميات المرتبطة بالغاز وتلك المرتبطة بالوسط المحيط دون تغيير اى اشارة

٢. **تحدد** أي بند من بنود هذا الحساب يُستبعد بناءً على العناصر التي تحددها المسألة، والحصول على البند الميكانيكي من الحجم الذي يكتسحه المكبس.

٣. **توقع** التغير فى درجة الحرارة لكمية غازعند ضغط الغاز أو تمدده بينما تظل الحرارة دون فقد .

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر

أغلق فوهة مضخة دراجة بإصبعك، وادفع المكبس إلى الداخل بقوة وسرعة. لا يلامس الهواء المحبوس أي لهب، ومع ذلك تسخن أسطوانة المضخة بوضوح قرب الطرف المغلق. لم تضف حرارة؛ بل بذلت شغلًا بضغط الهواء، فارتفعت درجة حرارته. يمكن أن يؤدي ضغط الغاز بسرعة وتسخينه إلى بقاءه في نفس الحالة الأكثر درجة حرارة .

الفكرة الرئيسية:

تصل الطاقة الداخلية إلى غاز محبوس في صورة حرارة Q_{in} [J] أو شغل مبذول W_{out} [J].

في أي اتجاه ينتقل مخزون الطاقة الداخلية U [J] في كل حالة؟

وصف الشكل 1-5-1: مضخة دراجة محكمة؛ يغلق إصبع الفوهة بينما يُدفع المكبس إلى الداخل، فينضغط الهواء المحبوس ويسخن.

تنبأ:

(أ) عند دفع المكبس سريعًا إلى الداخل والفوهة مغلقة، هل تزداد الطاقة الداخلية للهواء المحبوس أم تنقص أم تظل ثابتة؟

(ب) إذا سمحت بدلًا من ذلك للغاز بالتمدد من دون أن تدخل إليه حرارة أو تخرج منه، فهل ترتفع درجة حرارته أم تنخفض أم تظل ثابتة؟

استكشف — اضغط الهواء المحبوس واقرأ الحرارة

ما ستفعله: قِس تغير درجة حرارة كمية محكمة من الهواء عندما تبذل عليها شغلًا بضغطها من دون إضافة حرارة، لتلاحظ أن الشغل وحده يرفع طاقتها الداخلية.

الزمن: 15 دقيقة

ما تحتاجه (الأدوات):

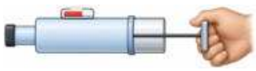
- مضخة دراجة
- إصبع أو غطاء لإحكام الفوهة
- شريط لقياس درجة الحرارة يُلصق على السطح
- مسطرة لتحديد مسافة دفع ثابتة.

مسطرة

شريطة قياس الحرارة

مضخة دراجة

الخطوات:



وصف الشكل 1-5-2: مضخة محكمة الغلق عند المخرج، وشريط حرارة مثبت قرب الطرف المحكم، ويد تدفع المكبس لتبذل شغلًا على الغاز المحبوس.

① أغلق الفوهة بإصبعك، وثبّت شريط درجة الحرارة على الأسطوانة قرب الطرف المغلق، واقرأ درجة الحرارة الابتدائية قبل T.

② ادفع المكبس سريعًا خلال المسافة الثابتة المحددة، بحيث لا تتسرب حرارة تُذكر؛ (المحاولة 1). واقرأ درجة الحرارة النهائية بعد T فورًا.

③ اترك الأسطوانة حتى تبرد وتعود إلى حالتها الأولى، ثم كرر الدفع ببطء خلال عدة ثوانٍ؛ (المحاولة 1). وبعد ذلك، مع بقاء الهواء مضغوطًا، حرر المكبس واترك الغاز يتمدد؛ (المحاولة 3)، ثم اقرأ درجة الحرارة مرة أخرى.

④ احسب لكل محاولة قبل T – بعد T = ΔT وسجّل إشارتها في العمود الأخير.

المحاولة	الفعل	T قبل °C	T بعد °C	ΔT = T بعد + T قبل (°C)
١	ضغط سريع			
٢	ضغط بطيء			
٣	تمدد			

★ ملاحظة قياس: اقرأ الشريط خلال ثانية واحدة من الدفع؛ فالأسطوانة الدافئة تبدأ فورًا في تسريب الحرارة إلى الغرفة، وقد تخفي القراءة البطيئة الارتفاع. واتركها تبرد تمامًا إلى درجة حرارة الغرفة قبل كل محاولة جديدة.

حلّل ما جمعته:

(أ) انظر إلى العمود الأخير: في أي المحاولات تكون ΔT موجبة، وفي أيها تكون سالبة؟ وكيف تقارن إشارة ΔT في الضغط السريع بإشارتها عند تحرير المكبس؟

(ب) لا يلامس الهواء اللهب، ولذلك ($Q_{in} = 0$) ماذا تخبرك ΔT الموجبة عن الشغل المبذول على الغاز وعن طاقته الداخلية؟ وتنبأ بإشارة ΔU عندما يتمدد الغاز ويدفع المكبس إلى الخارج.

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

بوابتان، حساب واحد

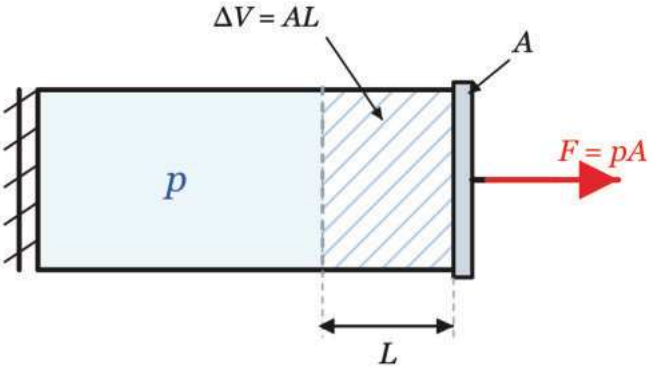
تصل الطاقة إلى الغاز المحبوس عبر طريقتين (فتحتين) بالضبط ولا غيرهما. إحداهما حرارية: حيث يكون الجدار أبرد أو أكثر سخونة من الغاز، فتتسرب الطاقة خلاله دون أي حركة. والأخرى ميكانيكية: شيء ما يدفع الحدود، أو يدفعها الغاز بدوره. وأي شيء يصل خلال أي من الفتحتين لا يجد مكانًا آخر يذهب إليه، لذلك ينتهي به المطاف في الطاقة المختزنة الذي قيس في الدرس السابق — وهذا هو كل ما يؤكده القانون الأول للديناميكا الحرارية.. إنها مسألة حسابية أكثر منها اكتشافًا يتعلق بالغازات، وستكون النتيجة نفسها بالنسبة لزنبرك أو بطارية.

ما يجعل الأمر يبدو أصعب مما هو عليه، هو أن كل فتحة يمكن وصفها من أي جانب من جانبي الجدار. فكل جول يمتصه الغاز هو جول يفقده اللهب؛ وكل جول يستهلكه الغاز لدفع المكبس هو جول يكتسبه المكبس. لذا فإن كل كمية في هذا الدرس تأتي في زوج متطابق يختلف عنصره الآخر بعلامة السالب ولا شيء غير ذلك.

حدد الغاز كنظام قبل أن تدون أي شيء، واربط كل رمز به، واعتبر الإجابة السالبة اتجاهًا — خروج الطاقة — بدلاً من اعتبارها خطأً.

أوقف تشغيل أحد المصطلحات، فيظهر تغييرٌ للمسمى.

كل تغير من التغيرات الأربعة المسمى هو نفس الحساب مع إيقاف أحد المتغيرات، ويكمن الاهتمام في تحديد أي بند تم إيقافه ولماذا. ثبّت الحجم ولن يتغير الحد الفاصل أبدًا (العملية الايزوكورية isochoric)؛ فالقوة التي لا تحرك شيئًا لا تنقل شيئًا، لذا لا يوجد شغل ميكانيكي وتظهر كل الطاقة الحرارية على شكل ارتفاع في درجة الحرارة. ثبّت الضغط بدلاً من ذلك (العملية الايزوبارية isobaric)، و يمكن قراءة الشغل الميكانيكي من تغير الحجم وحده: يضغط الغاز على مكبسه ذي المساحة A بقوة PA ويدفعه لمسافة L، مما يعطي.



وصف الشكل 1-5-3: عند ضغط ثابت P، يدفع الغاز مكبسًا مساحته A مسافة L، ويؤدي بذلك شغل ميكانيكى

$$W = FL = PA \times L = P \times AL$$

«A.L» هي ببساطة الحجم الذي يتم إخراجه، لذا لا يؤثر شكل المكبس أو حجمه على النتيجة. إذا ثبتنا درجة الحرارة (العملية الايزوثرمية isothermal)، فإن الدرس 1-4 يقوم بالمهمة عنّا: يتم تحديد الطاقة المختزنة للغاز المثالي بكمية المادة ودرجة الحرارة وحدهما، لذا فإن درجة

حقيقة أساسية:

القياس الشغل الميكانيكي: مكبس بمساحة $1.0 \times 10^{-3}\ m^3$ يتم دفعه مسافة 0.10 m مقابل ضغط يبلغ 1.0×10^5 Pa ينقل 10 J فقط — وهو مقدار ضئيل مقارنة بالحرارة التي يولدها الموقد في ثانية واحدة، ولهذا السبب فإن التمددات الطفيفة أقل أهمية بكثير في حساب الطاقة مقارنة بالتسخين القوي.

مصطلح:

ما مدى مثالية مصطلح «أدياباتيكي adiabatic»؟ — لا يوجد جدار يعزل الحرارة بشكل مثالي، لذا فإن هذا المصطلح هو في الحقيقة وصف للسرعة: يجب أن ينتهي التغير قبل أن يتسنى لكمية ملحوظة من الحرارة التسرب خلاله. نفس ضربة المضخة. تكون شبه أدياباتيكية عندما تكون سريعة وشبه أيزوثرمية (درجة الحرارة ثابتة) عندما تكون بطيئة، وكل عملية حقيقية تقع في مكان ما بين هذين النموذجين المثاليين بدلاً من أن تكون في أي منهما.

الحرارة الثابتة تجمد الطاقة المختزنة، ويجب أن تخرج الحرارة التي تدخل مرة أخرى على شكل شغل مبذول في نفس اللحظة، جول مقابل جول، بينما يحافظ PV على قيمته. أما إذا أغلقت الغاز حراريًا بدلاً من ذلك (العملية الاديباتية adiabatic)، فلا يتبقى سوى الشغل الميكانيكي: كل ما يُفعل بالغاز يُضاف إلى الطاقة الطاقة المختزنة، ولهذا السبب يؤدي الضغط السريع إلى تسخين الغاز، بينما يؤدي التمدد السريع إلى تبريده مثل أسطوانة المضخة وعلبة الرذاذ (البخاخة) في يدك.

نقطة

! القانون الأول للديناميكا الحرارية يُعطى التغير في الطاقة الداخلية $\Delta U(J)$ للغاز بالصيغة التالية:

$$\Delta U = Q_{in} + W_{in}$$

حيث $Q_{in}(J)$ هي كمية الحرارة التي يمتصها الغاز (المكتسبة) و W_{in} (J) هي الشغل المبذول على الغاز.

لنفترض أن كمية الحرارة المنبعثة من الغاز (المفقودة) هى $Q_{out}(J)$، فإن $Q_{out} = -Q_{in}$،

ولنفترض أن الشغل المبذول بواسطة الغاز هو W_{out} (J)، فإن $W_{out} = -W_{in}$

! التغير ثابت الحجم (التغير مع الحفاظ على حجم الغاز ثابتًا) (العملية الايزوكورية)، في التغير ثابت الحجم (لا يوجد شغل مبذول بواسطة الغاز) $W_{out} = 0$

! التغير ثابت الضغط (التغير مع الحفاظ على ضغط الغاز ثابتًا) (العملية الايزوبارية)، في التغير ثابت الضغط $W_{out} = P\,\Delta V$

! التغير ثابت درجة الحرارة (التغير مع الحفاظ على درجة حرارة الغاز ثابتة)) العملية الايزوثرمية)، في التغير ثابت درجة الحرارة $(\Delta U = 0)$ لذا $W_{out} = Q_{in}$

في العملية الايزوثرمية (التغير ثابت درجة الحرارة) لمعادلة الغاز المثالى ثابت = PV

! العملية الاديباتيكية (العزل الحرارى) (لا يوجد انتقال للحرارة) (لا يفقد او يكتسب حرارة) لذا $W_{in} = Q_{in}$، $\Delta U = 0$

صندوق المعادلات:

القانون الأول	$\Delta U = Q_{in} + W_{in}$
العملية الايزوكورية (ثابت الحجم)	$W_{out} = 0 \Rightarrow \Delta U = Q_{in}$
العملية الايزوبارية (ثابت الضغط)	$W_{out} = P\Delta V$ $W = FL = PA \times L = P \times AL = P\Delta V$
العملية الايزوثرمية (ثابت درجة الحرارة)	$\Delta U = 0 \Rightarrow W_{out} = Q_{in}$
العملية الاديباتية (العازل حراريا)	$Q_{in} = o \Rightarrow W_{out} = \Delta U$

ملاحظة:

تُمنح الإشارات هنا ميزات كثيرة مقارنةً بالفيزياء. قبل إجراء أي تعويض، اكتب الكمية التي حددت لك المسألة — الحرارة الداخلة إلى الغاز (الحرارة التى يمتصها الغاز) أو الخارجة منه (الحرارة المنبعثة من الغاز)، أو الشغل المبذول على الغاز أو المبذول بواسطة الغاز — وقم بتحويلها إلى * القاعدة المتبعة أولاً. الغاز المتمدد يعطي دائمًا Win < 0، لذا فإن الانضغاط الذي يرفع درجة الحرارة والتمدد الذي يخفضها هما نفس المعادلة التي تُقرأ في اتجاهين مختلفين.

مثال محلول:

الموقف:	عيّن ما يأتي لأقرب رقمين عشريين (أ) لكل تغير، عيّن الشغل المبذول على الغاز W بالجول والتغير في الطاقة الداخلية ΔU بالجول ١– زُوّد غاز بـ J 45 من الحرارة عند حجم ثابت ٢– زُوّد غاز بـ J 70 من الحرارة عند ضغط ثابت 1.0×10^5 Pa، وتمدد حجمه بمقدار 3.0×10^{-4} m³ ٣– زُوّد غاز مثالي بـ J 75 من الحرارة عند درجة حرارة ثابتة. (ب) يتمدد غاز داخل وعاء أديباتي (عازل للحرارة)؛ فإذا كان الشغل الذي بذله الغاز J 45، فعيّن ΔU.
المعطيات والمطلوب:	نتخذ الغاز نظامًا. (أ) ١– $Q_{in} = 45$ J والحجم ثابت. ٢– $Q_{in} = 70$ J، و$P = 1.0 \times 10^5$ Pa، و $\Delta V = 3.0 \times 10^{-4}$ m³. ٣– $Q_{in} = 75$ J ودرجة الحرارة ثابتة. (ب) $Q_{in} = 0$ لأن العملية أديباتية، و $W_{out} = 45$ J
التمثيل:	انظر الشكل 1–5–3 للاطلاع على الحالة الإيزوبارية (ii)، حيث يبذل الغاز شغلًا PΔV على المكبس. في كل جزء، حدد أي من Q_{in} و W و ΔU يحدده نوع التغير قبل إجراء التعويض.
الاستراتيجية:	نحدد الحرارة المزودة إلى الغاز والشغل الذي يبذله على الوسط والتغير في طاقته الداخلية، مع الانتباه إلى الإشارات، ثم نعوض في $Q_{in} = \Delta U + W_{out}$، وهي مكافئة للعلاقة $\Delta U = Q_{in} + W_{out}$. والشغل المبذول على الغاز $W_{out} = -W_{out}$.
الحل الموضح:	(أ) ١– عند الحجم الثابت $W_{out} = 0$، ولذلك $W = 0$ J، ثم $\Delta U = Q_{in} + W = 45 + 0 = 45$ J. ٢– عند الضغط الثابت $W_{out} = P\Delta V = (1.0 \times 10^5) \times (3.0 \times 10^{-4}) = 30$ J ومن ثم يكون الشغل المبذول على الغاز $W = W_{out} = -30$ J، ثم $\Delta U = 70 - 30 = 40$ J ٣– في تغير متساوي الحرارة لغاز مثالي $\Delta U = 0$، ولذلك $W_{out} = Q_{in} = 75$ J، ومنه $W = -75$ J و $\Delta U = 0$ J (ب) الوعاء أديباتي، ولذلك $Q_{in} = 0$. والشغل الذي يبذله الغاز $W_{out} = 45$ J، ومن ثم $W = -45$ J، و $\Delta U = 0 + (-45) = -45$ J

منطقية الحل:	في (أ) ١- لا يُبذل شغل، فتتحول الحرارة كلها إلى طاقة داخلية ويسخن الغاز. ٢- يبذل الغاز 30 J في دفع حدوده، فلا يتبقى من 70 J لزيادة الطاقة الداخلية إلا 40 J ٣- لا تتغير الطاقة الداخلية عند ثبوت درجة الحرارة، فتخرج كل جول من الحرارة مرة أخرى في صورة شغل. (ب) لا تدخل حرارة، فلا يستطيع الغاز المتمدد دفع 45 J من الشغل إلا بفقد 45 J من طاقته الداخلية، ولذلك يبرد.
فسِّرها بنفسك:	لماذا تكون إشارة W، أي الشغل المبذول على الغاز، سالبة كلما تمدد الغاز؟ ولماذا يترك التغير متساوي الحرارة لغاز مثالي $\Delta U = 0$؟

حاول بنفسك: يمتص غاز عند ضغط ثابت 1.0×10^5 Pa مقدار 60 J من الحرارة، ويتمدد حجمه بمقدار 2.0×10^{-4} m^3. أوجد الشغل المبذول على الغاز W والتغير في الطاقة الداخلية ΔU.

حاول:

١- عيّن ما يأتي لأقرب رقمين عشريين لكل تغير، عيّن الشغل المبذول على الغاز W بالجول والتغير في الطاقة الداخلية ΔU بالجول

(i) عندما يزوَّد الغاز بـ 30 J من الحرارة عند حجم ثابت.

(ii) زُوّد غاز بـ 75 J من الحرارة عند ضغط ثابت 1.0×10^5 Pa، وتمدد حجمه بمقدار 3.0×10^{-4} m^3.

(iii) زُوّد غاز مثالي بـ 60 J من الحرارة عند درجة حرارة ثابتة.

٢- تمدد غاز في وعاء أديباتي. إذا كان الشغل الذي بذله الغاز 50J ، فعيّن التغير في طاقته الداخلية.

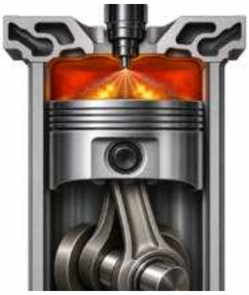
في سياق جديد

لا تحتوي محركات الديزل على شمعة إشعال. ففي شوط الانضغاط يضغط المكبس الهواء داخل الأسطوانة بسرعة شديدة حتى لا تتسرب منه حرارة تُذكر؛ أي يحدث انضغاط أديباتي. ويتحول كل الشغل المبذول على الهواء إلى طاقة داخلية $\Delta U = W_{out}$، فترتفع درجة الحرارة إلى حد يكفي لاشتعال الوقود المرشوش في الهواء الساخن من تلقاء نفسه. والقانون الأول نفسه الذي يبرد الغاز المتمدد يسخن الغاز المضغوط.

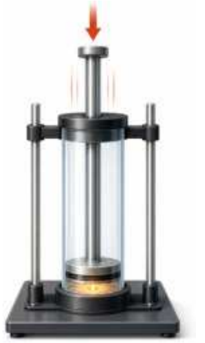
دورك الآن: ضُغط الهواء أديباتيًا داخل أسطوانة، وبُذل عليه شغل مقداره 80 J. استخدم $Q_{in} = 0$ لإيجاد ΔU، واذكر هل يسخن الهواء أم يبرد.

طبيعة العلم

من الأصل - «مكبس النار» الذي يشعل النار بضغط الهواء. ضع كمية صغيرة من القطن في أسطوانة شفافة مزودة بمكبس، ثم ادفع المكبس بقوة؛ فيشتعل القطن فجأة ويحترق. إن ضغط الغاز بسرعة عملية أديباتية يُبذل فيها شغل خارجي على الغاز، فتزداد طاقته الداخلية بشدة وترتفع درجة حرارته ارتفاعًا كبيرًا. وتستخدم محركات الديزل الآلية نفسها، إذ تحقن الوقود في هواء سخن بالانضغاط الأديباتي فيشتعل.



الشكل 1-5-4: عند نهاية شوط الانضغاط في محرك الديزل يُحصر الهواء في حيز صغير شديد السخونة، فتشتعل حزمة الوقود الدقيقة المرشوشة من الحاقن من دون شمعة إشعال.



وصف الشكل 1-5-5: مكبس نار؛ يؤدي دفع المكبس سريعًا إلى أسفل إلى ضغط الهواء المحبوس أديباتيًا، فترتفع درجة حرارته إلى حد يشعل القطن بوميض

يمثل مكبس النار اختبارًا واضحًا لنموذج فيزيائي؛ فالقانون الأول يتنبأ بأنه عند انعدام انتقال الحرارة يجب أن يظهر كل الشغل المبذول على الغاز في صورة طاقة داخلية، ويجعل وميض القطن هذه الطاقة الخفية مرئية. وهكذا تستطيع تجربة واحدة قابلة للتكرار أن تحول معادلة مجردة إلى شيء يمكن رؤيته.

دورك الآن: اقترح جهازًا أو حدثًا يوميًا يسخن غازًا أو يبرده أساسًا عن طريق بذل شغل عليه، لا بإضافة حرارة، وحدد هل العملية أقرب إلى الأديباتية أم إلى الايزوثرمية.

سؤال الدرس، وإجابته:

تتحدد حالة الغاز بطاقته الداخلية، ويوضح القانون الأول $\Delta U = Q_{in} + W_{in}$ طريقتين لتغييرها: تزويد الغاز بالحرارة، وبذل شغل عليه. وتتحدد الكميات المتغيرة بحسب ما يبقى ثابتًا: الحجم، حيث $W_{out} = 0$؛ أو الضغط، حيث $W_{out} = V\Delta P$؛ أو درجة الحرارة، حيث $\Delta U = 0$؛ أو تدفق الحرارة، ففي العملية الأديباتية $Q_{in} = 0$. ولذلك يمكن لضغط الغاز أن يسخنه مثلما يفعل تزويده بالحرارة.

المشهد الذى بدأنا به

تمرين:

(أ) عيّن ما يأتي لأقرب رقمين عشريين لكل تغير، عيّن الشغل المبذول على الغاز W بالجول والتغير في الطاقة الداخلية ΔU بالجول.

(i) عندما يزوَّد الغاز بـ 15 J من الحرارة عند حجم ثابت.

(ii) زُوّد غاز بـ 25 J من الحرارة عند ضغط ثابت 1.0×10^5 Pa، وتمدد حجمه بمقدار 4.5×10^{-4} m^3.

(iii) زُوّد غاز مثالي بـ 80 J من الحرارة عند درجة حرارة ثابتة.

(ب) زُوّد غاز بـ 35 J من الحرارة عند ضغط ثابت 1.0×10^5 Pa، وتمدد حجمه بمقدار 2.0×10^{-4} m^3. عيّن الشغل المبذول على الغاز W والتغير في الطاقة الداخلية ΔU.

(جـ) زُوّد غاز بـ 75 J من الحرارة عند حجم ثابت. عيّن الشغل المبذول على الغاز W والتغير في الطاقة الداخلية ΔU.

(د) تمدد غاز في وعاء أديباتي. إذا كان الشغل الذي بذله الغاز 35J، فعيّن التغير في طاقته الداخلية.

الدرس ١-٦ — السعة الحرارية المولية

؟ سؤال الدرس:

ما مقدار الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة واحد مول من الغاز واحد درجة كلفنية ؟ ولماذا يختلف هذا المقدار عند ثبوت الحجم أو عند ثبوت الضغط؟

ستتعلم

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. حدد -من خلال المسألة- الشرط اللازم تطبيقه أثناء تسخين الغاز، واختر السعة الحرارية المناسبة قبل التعويض بأي قيم عددية.

٢. حوّل بين السعتين الحراريتين للغاز نفسه باستخدام علاقة ماير (Mayer's relation)، ووضّح -استناداً إلى حساب الطاقة- سبب اختلافهما بمقدار ثابت الغاز (R) تماماً.

٣. اذكر قيمتي السعة الحرارية لغاز أحادي الذرة بدلالة مضاعفات الثابت R، وبيّن ما يتغير عندما تتوقف الجزيئات عن كونها أحادية الذرة.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر

ضع نفس مصدر الحرارة أسفل إناءين (قدرين). يحبس قدر الضغط المغلق (حلة الضغط) بخاره عند حجم يكاد يكون ثابتًا، فتؤدي الحرارة إلى ارتفاع سريع في الضغط ويمكن أن تتجاوز درجة حرارة الماء بداخله 100°C قبل أن يغلي. أما الإناء (القدر) المفتوح فيظل عند ضغط جوي ثابت؛ لذا تظل درجة حرارة الماء فيه عند 100°C وتخرج الحرارة الزائدة على شكل بخار؛ هذا الاختلاف اليومي يتعلق بالغليان — لكنه يستند إلى التمييز الذي يقوم عليه هذا الدرس. إذا حافظت على الغاز عند حجم ثابت، فإن كل جول يُزوَّد له يرفع درجة حرارته؛ أما إذا تركته يتمدد عند ضغط ثابت، ويدفع هواء الوسط المحيط فيستهلك جزءًا من تلك الحرارة في بذل هذا الشغل. أما إذا زودت كليهما بنفس مقدار الحرارة ،فسيصبح أحدهما أكثر سخونة من الآخر(فلن يصلا إلى نفس درجة الحرارة).

حقيقة أساسية:

السعة الحرارية المولية (J/mol.K):

يحتاج رفع درجة حرارة واحد مول من الغاز بمقدار 1 K إلى مقدار مختلف من الحرارة عند ثبوت الحجم وعند ثبوت الضغط.

هل تتوافق قيم C_V (عند ثبات V) و C_P (عند ثبات P)؟

حجم ثابت
ضغط ثابت

شكل (1.6.1): مقدار كمية الحرارة نُزوّد قدر ضغط مغلقًا، حيث الحجم ثابت، وإناءً مفتوحًا، حيث الضغط ثابت. يسخن الغاز الذي لا يستطيع التمدد بدرجة أكبر

توقَّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) بعد تزويد العيّنتين بنفس لمقدار من كمية الحرارة، أيهما تصل إلى درجة حرارة أعلى: العينة ثابتة الحجم أم العينة ثابتة الضغط؟

(ب) في أي العيّنتين يبذل الغاز شغلاً على الوسط المحيط أثناء التسخين؟

استكشف — مقدار الحرارة نفسه ووعاء ان

ما ستفعله: سخّن الغاز نفسه بمقدار الزيادة نفسه في درجة الحرارة داخل دورق ثابت الحجم وأسطوانة ذات مكبس حر الحركة، ثم قِس مقدار الحرارة الإضافية التي يحتاج إليها الجهاز ثابت الضغط.

الزمن: 15 دقيقة

ما تحتاجه (الأدوات):

- دورق صلب ثابت الحجم
- أسطوانة مغلقة بمكبس حر الانزلاق ثابت الضغط
- سخان مزود بعداد للجول لتسخين عينة الغاز نفسها في كل جهاز
- ترمومتر لكل وعاء
- قيمة كمية الغاز n بالمول المحبوس في كل وعاء كما هي مدونة على الجهاز.

ترمومتر

سخان

أسطوانة مكبس

قارورة صلبة

الخطوات:

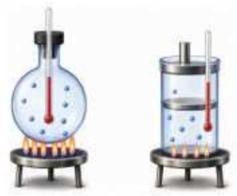
١ ضع الكمية نفسها n من الغاز نفسه في الدورق الصلب وفي أسطوانة المكبس، واجعل درجتي الحرارة الابتدائية متساويتين.

٢ سخّن كل عينة بالسخان المتماثل، واقرأ مقدار الحرارة المزودة حتى يرتفع الترمومتر بمقدار ΔT المختار. سجّل Q_V للدورق و Q_P للأسطوانة.

٣ احسب العمود المشتق $(Q_P - Q_V)/(n\Delta T)$، وهو مقدار الحرارة الإضافية لكل مول ولكل كلفن التي احتاج إليها الجهاز ثابت الضغط.

٤ كرر التجربة عند قيمة مختلفة لـΔT، وإذا أمكن عند قيمة مختلفة لـn، ثم قارن العمود المشتق بين المحاولات.

المحاولة	Q_V (عند حجم ثابت) (J)	Q_p (عند ضغط ثابت) (J)	$(Q_p - Q_V) / (n\Delta T)$ $[J/(mol.K)]$
١			
٢			
٣			


الشكل (2.6.1): الغاز نفسه داخل دورق صلب ثابت الحجم وأسطوانة ذات مكبس ثابت الضغط، وفي كل منهما ترمومتر، ويُسخنان بسخانين متماثلين.

ملاحظة القياس:
استخدم قيمة n نفسها والزيادة المستهدفة ΔT نفسها في الوعاءين في كل محاولة، واترك المكبس يتحرك بحرية حتى يظل الضغط ثابتًا حقًّا أثناء ارتفاعه.

حلّل ما جمعته:

(أ) في كل محاولة، أي الوعاءين احتاج إلى حرارة أكبر لتحقيق نفس ΔT؟ وهل تظل قيمة $(Q_P - Q_V)/(n\Delta T)$ ثابتة عند تغيير ΔT؟

(ب) تساوي هذه القيمة الثابتة ثابتًا معروفًا. ما هو؟ واستخدمه للتنبؤ بقيمة $C_P - C_V$ لأي غاز مثالي قبل دراسة علاقة ماير.

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

إذا سألت عن مقدار الطاقة اللازمة لرفع درجة حرارة غاز بمقدار درجة واحدة، فإنك لم تطرح بعد سؤالًا صحيحًا: فالأمر يعتمد على ما يُسمح للغاز بفعله أثناء تسخينه. أما الكتلة المعدنية فلا يمكنها التحرك في أي اتجاه، لذا يكفي رقم واحد لوصفها. أما الغاز فيمكنه دفع حدوده إلى الخارج، وإذا فعل ذلك، فإن جزءًا من الطاقة التي تزوده بها يخرج مرة أخرى عبر

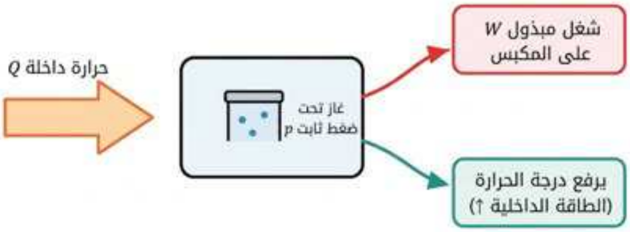
«الشغل الميكانيكي» الذي تعلمناه في الدرس السابق قبل أن يسجله مقياس الحرارة. ولذلك، فإن تجربتين دقيقتين على نفس الغاز بالذات تعطيّان رقمين مختلفين — وكلاهما صحيح. تحتفظ الفيزياء بكليهما، وتربط كل رقم بـالشرط الذي أدى إلى إنتاجه. إن ذكر مثل هذا الرقم لغاز ما دون تحديد ذلك الشرط يشبه ذكر طول دون وحدة قياس.

استنتاج الفرق بينهما

قم بإجراء التجربتين جنبًا إلى جنب على n مول ثم رفع درجة حرارتها بواسطة ΔT. مع تثبيت الحجم ، لا يتحرك الحد الفاصل أبدًا، لذا فإن حساب الطاقة في الدرس 5–1 يحتوي على قيمة واحد ، وكل جول يتم توفيره ينتهي به المطاف في المخزن: فالحرارة المطلوبة هي مجرد الزيادة في الطاقة الداخلية. أما عند تثبيت الضغط بدلاً من ذلك، فإن نفس الارتفاع في الطاقة المختزنة لا يزال مطلوبًا — بالنسبة للغاز المثالي، يتأثر الطاقة المختزنة بالحرارة وحدها، لذا لا يهم أي تجربة تجريها — لكن الغاز الآن يدفع مكبسه أيضًا ويبذل $P\Delta V$ في أثناء ذلك. اطرح إحدى التجربتين من الأخرى، وسيكون الفرق في الحرارة المزودة هو بالضبط هذا التعويض. ثم تحدد معادلة الحالة قيمته عند ضغط ثابت: $PV = nRT$

$$P\Delta V = nR\Delta T$$

لذا فإن الحرارة الزائدة لكل مول لكل كلفن تساوي R نفسها — ولا تبقى أي خاصية من خصائص الغاز المعين بعد القسمة، ولهذا السبب يُذكر هذا التناسب لكل غاز مثالي دفعة واحدة. تأتي القيمتان أحاديتا الذرة من نفس المصدر. حدد الدرس 4–1 الطاقة المختزنة الغاز المثالي أحادي الذرة من العلاقة $(\frac{3}{2}nRT)$ ، لذا فإن رفعه بمقدار ΔT يستلزم $(\frac{3}{2}nRT)$؛ عند الحجم الثابت ، يمثل هذا الاجمالى ، والقسمة على $n.\Delta T$ تعطي $(\frac{3}{2}R)$. وإضافة نصيب المكبس من العلاقة التي تم اشتقاقها للتو ترفعها بمقدار واحد إضافي، مما يعطي $(\frac{5}{2}R)$. وكلاهما مضاعفات خالصة لـ R دون أي أثر للهيليوم أو الأرجون فيهما — نتيجة الدرس 4–1 بشأن الطاقة المختزنة، تظهر هنا مرة أخرى تحت اسم مختلف.



الشكل شكل (3.6.1): عند الضغط الثابت، تنقسم الحرارة الداخلة Q إلى: جزء يرفع الطاقة الداخلية (درجة الحرارة)، وجزء آخر يبذل شغلًا على المكبس الصاعد.

نقطة

! الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة مول واحد من الغاز بمقدار K1 هي سعته الحرارية المولية. عند ثبوت الحجم (العملية الايزوكورية) تسمى السعة الحرارية المولية عند ثبات الحجم CV، وفي عملية ثابتة الضغط (الايزوبارية) تسمى السعة الحرارية المولية عند ثبات الضغط CP، ووحدة كل منهما $J/(mol{\cdot}K)$

! لذلك تكون الحرارة Q اللازمة لتغيير درجة حرارة n من مولات الغاز بمقدار ΔT هي $Q_V = n\,C_V\,\Delta T$ في العملية ثابتة الحجم، و $Q_P = n\,CP\,\Delta T$ في العملية ثابتة الضغط.

! السعة الحرارية المولية عند ثبات الحجم C_V و السعة الحرارية المولية عند ثبات الضغط C_P ترتبطان معا بعلاقة ماير

$$C_P = C_V + R$$

! السعة الحرارية المولية عند ثبات الحجم C_V $J/(mol{\cdot}K)$ و السعة الحرارية المولية عند ثبات الضغط C_P $J/(mol{\cdot}K)$ لغاز مثالي أحادي الذرة

$$C_V = \frac{3}{2}R$$

$$C_P = \frac{5}{2}R$$

حقيقة أساسية:

قيم هذه الأعداد: عند استخدام القيمة $R = 8.3\ J/mol.K$، نجد أن قيمة السعة الحرارية للغاز أحادي الذرة تبلغ حوالي $12\ J/mol.K$ عند ثبات الحجم، وحوالي $21\ J/mol.K$ عند ثبات الضغط. وعليه، فإن رفع درجة حرارة مول واحد من الهيليوم بمقدار كلفن واحد في ظل الضغط الجوي يتطلب قدراً من الطاقة يعادل تقريباً الطاقة اللازمة لرفع كتاب كتلته 2 كجم لمسافة متر واحد.

مصطلح (Term):

إلى أي مدى يصل العددان؟ القيمتان 5/2 R و 3/2 R تمثلان حالة الغاز أحادي الذرة فقط، ولا تعنيان أكثر من ذلك. يمكن للغاز ثنائي الذرة أيضًا أن يدور، ولذلك يخزن طاقة أكبر لكل كلفن، وتزداد قيمة سعته الحرارية عند ثبات الحجم تدريجيًا باتجاه: 5/2 R وعند درجات حرارة أعلى، تبدأ الرابطة بين الذرتين في الاهتزاز، فتزداد القيمة مرة أخرى. ومع ذلك، تظل علاقة ماير (Mayer's relation) صحيحة في كل هذه الحالات، لأن اشتقاقها يعتمد فقط على معادلة الحالة، بينما القيمتان الخاصتان بالغاز أحادي الذرة لا تظلان ثابتتين.

ملاحظة:

الخطأ الشائع هو اختيار السعة الحرارية غير الصحيحة. قبل التعويض في المعادلة، ابحث في السؤال عن الكلمات التي تحدد ظروف العملية:

من ناحية:
وعاء صلب
محكم الغلق
حجم ثابت
ومن ناحية أخرى:
مكبس حر الحركة
مفتوح على الغلاف الجوي
ضغط ثابت

وبعد تحديد الشرط المناسب فقط، اختر C_V أو C_P في العلاقة: $Q = nC\Delta T.$ للمعادلة Cp أو CV

حيث: عند ثبات الحجم نستخدم C_V.
عند ثبات الضغط نستخدم C_P.

وإذا أعطاك السؤال إحدى السعتين الحراريتين وطلب الأخرى، فلا تبدأ الحساب من جديد؛ استخدم علاقة ماير (Mayer's relation)

صندوق المعادلات:

الحرارة عند حجم ثابت	$Q_V = n\,C_V\,\Delta T\ J/(mol{\cdot}K)$
الحرارة عند ضغط ثابت	$Q_P = n\,C_P\,\Delta T\ J/(mol{\cdot}K)$
علاقة ماير	$C_P = C_V + R$
الغاز المثالى أحادى الذرة	$C_V = \frac{3}{2}R$ $C_P = \frac{5}{2}R$

مثال محلول:

الموقف:	إذا تم إمداد 0.80 mol من غاز مثالي عند حجم ثابت بمقدار 170 J من الحرارة، فارتفعت درجة حرارته بمقدار 10 K، فعيّن سعته الحرارية المولية عند ثبات الحجم بوحدة J/(mol·K) لأقرب رقمين عشريين
المعطيات والمطلوب:	$Q = 170\ J$، و $n = 0.80\ mol$، والعملية ثابتة الحجم، و $\Delta T = 10\ K$. المطلوب C_V بوحدة $J/(mol{\cdot}K)$.
التمثيل:	كمية ثابتة من الغاز في وعاء صلب لا يستطيع تغيير حجمه، وتُسخن بحرارة مزودة Q، كما في الدورق الصلب في الشكل 1-6-2.
الاستراتيجية:	نحدد هل العملية ثابتة الحجم أم ثابتة الضغط، ثم نستخدم $Q = nC\Delta T$ مع السعة الملائمة. هنا الحجم ثابت، ولذلك نستخدم $Q_V = nC_V\Delta T$ ونحل لإيجاد C_V.
الحل الموضح:	في العملية ثابتة الحجم تمثل C_V الحرارة اللازمة لتغيير درجة حرارة مول واحد بمقدار 1 K، ولذلك $Q = nC_V\Delta T$. $170 = 0.80 \times C_V \times 10$. $C_V = 170 \div (0.80 \times 10) = 170 \div 8.0 = 21.25 \approx 21\ J/(mol{\cdot}K)$.
منطقية الحل:	نحو $21\ J/(mol{\cdot}K)$، تساوي عدة أمثال ثابت الغاز $R \approx 8.3\ J/(mol{\cdot}K)$، وهي الرتبة الصحيحة لسعة حرارية مولية؛ ولذلك تعد الإجابة معقولة.
فسِّرها بنفسك:	اذكر في جملة لماذا يكون اختيار C_V بدلًا من C_P هو الخطوة الصحيحة عندما يكون الوعاء صلبًا.

حاول بنفسك: إذا تم إمداد 0.50 mol من غاز مثالي عند حجم ثابت بمقدار 250 J من الحرارة، فارتفعت درجة حرارته بمقدار 20 K، فعيّن سعته الحرارية المولية عند ثبات الحجم بوحدة J/(mol·K) ولأقرب رقمين عشريين

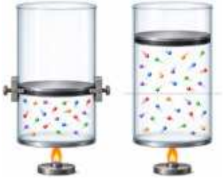
حاول:

إذا تم إمداد 1.50 mol من غاز مثالي عند ضغط ثابت بمقدار 63 J من الحرارة، فارتفعت درجة حرارته بمقدار 2.0 K فعين سعته الحرارية المولية عند ثبات الضغط CP، سعته الحرارية المولية عند ثبات الحجم CV على الترتيب بوحدة J/(mol·K) ولأقرب رقمين عشريين خذ R ‎.= 8.3 J/(mol·K)

في سياق جديد — الهبوط عبر الرياح

تتجاوز النسبة $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ إلى ما وراء تجربة التسخين؛ فهي تحدد سرعة الصوت في الغاز. تضغط موجة الصوت الهواء وتمدده بسرعة أكبر من أن تتسرب الحرارة، ولذلك تتحدد مرونة الغاز التي تشعر بها الموجة بقيمة γ، وتصبح السرعة $\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$. حيث M (kg) هي كتلة مول واحد من الغاز. وبالتالي، فإن قياس الوقت الذي يستغرقه الصوت لعبور غرفة ما يقيس قيمة γ للهواء — ونظرًا لأن γ تبلغ حوالي 1.67 لغاز مكون من ذرة واحدة، ولكنها تبلغ حوالي 1.4 لغاز مكون من ذرتين، فإن هذا القياس البسيط يكشف أن الهواء يتكون من جزيئات مكونة من ذرتين، وليس من ذرات منفردة.

دورك الآن: باستخدام R = 8.3 J/(mol·K)، أوجد C_V و C_P لغاز مثالي أحادي الذرة لأقرب رقمين عشريين.



شكل (1.6.4): تُسخن عينتان متماثلتان من الغاز بالتساوي؛ يمنع المكبس المثبت في اليسار تغير الحجم، بينما يرتفع المكبس الحر في اليمين فوق موضعه الأصلي مع تمدد الغاز عند ضغط ثابت.

طبيعة العلم: من الأصل - لماذا يصعب رفع درجة الحرارة في عملية ثابتة الضغط؟

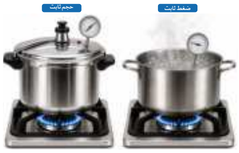
السعة الحرارية المولية هي الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة مول واحد من الغاز بمقدار K1، لكن عند ثبوت الضغط تلزم حرارة أكبر منها عند ثبوت الحجم. فعندما يُسخن الغاز عند ضغط ثابت يتمدد ويدفع المكبس إلى أعلى، فيبذل شغلًا على الوسط الخارجي. ولأن جزءًا من الطاقة الحرارية المزودة يُستخدم في هذا الشغل، يجب تزويد الغاز بطاقة إضافية لرفع درجة حرارته بنفس المقدار. هذه صورة من صور حساب الطاقة؛ فقد فصل الفيزيائيون الحرارة الداخلة إلى جزء يرفع الطاقة الداخلية وجزء يخرج في صورة شغل. وهذا الانقسام لا يُرى مباشرة، بل يُستدل عليه من شرط حفظ الطاقة. وتمثل علاقة ماير $C_p = C_v + R$ الصياغة الكمية لهذا الاستدلال، وتؤكدها التجارب عندما يتساوى الفرق المقاس بين السعتين مع R.

دورك: اقترح قياسًا يمكن إجراؤه على غاز حقيقي لاختبار هل $C_p - C_V$ يساوي R فعلًا، واذكر الكميات التي يجب تثبيتها.

وصف الشكل (1.6.5): عند تسخين الغاز تحت ضغط ثابت يتمدد ويدفع المكبس إلى أعلى من موضعه الابتدائي، فيبذل شغلًا على الوسط المحيط.

سؤال الدرس، وإجابته:

لا توجد إجابة واحدة، وهذه هي الإجابة: للغاز سعتان حراريتان، واحدة لكل طريقة يمكنك أن تمسكه بها أثناء تسخينه، ولا يكتمل السؤال إلا عندما تحدد أيهما. وعندما يكون الغاز محبوسًا في وعاء صلب، فإن كل ما تزوده به يُخزن كطاقة داخلية. أما إذا تُرك الغاز حرًا لدفع مكبس، فإنه يبذل جزءًا من الطاقة المزودة على الوسط المحيط قبل أن يقرأ الترمومتر، لذا يجب تزويده بمزيد من الطاقة لتحقيق نفس الارتفاع — وحد معادلة الحالة أن هذا الاجمالى يساوي بالضبط ثابت غاز واحد لكل مول لكل كلفن، أيا كان الغاز. بالنسبة للذرات المفردة، يخرج الرقمان بمقدار (1.5R) و (2.5 R)، مباشرة من الطاقة المختزنة المقاسة في الدرس 4-1؛ أما إذا أعطيت الجزيئات طريقة للدوران، فإن كلاهما يرتفع.



المشهد الذى بدأنا به

تمرين:

(أ) أجب لأقرب رقمين عشريين، مع افتراض $R = 8.3\ \text{J/(mol·K)}$. إذا زُوّد 1.2 mol من غاز مثالي عند حجم ثابت بمقدار 240 J من الحرارة، فارتفعت درجة حرارته بمقدار 12 K، فعيّن السعة الحرارية المولية عند الضغط الثابت CP لهذا الغاز بوحدة J/(mol·K).

(ب) مع افتراض $R = 8.3\ \text{J/(mol·K)}$. إذا تم إمداد (تزويد) 0.30 mol من غاز مثالي عند ضغط ثابت بمقدار 200 J من الحرارة، فارتفعت درجة حرارته بمقدار 25 K، فعيّن CP و CV على الترتيب بوحدة J/(mol·K).

الفصل الثانى

الكهرباء الساكنة

٢-١ — قانون كولوم

٢-٢ — المجال الكهربى

٢-٣ — الجهد الكهربى

٢-٤ — المجال الكهربى المنتظم وفرق الجهد

٢-٥ — حركة الشحنات تحت تأثير قوة

٢-٦ — المكثف

الدرس ٢-١ — قانون كولوم

؟ سؤال الدرس:
أدلك بالون ليجذب قصاصات ورق او يدفع بالونا أخر بعيدا عنه – ما الذى يحدد قوة قوة التجاذب أو التنافر بين جسمين مشحونين؟

سوف تتعلم أن

١. تعرّف الشحنة الكهربائية ووحدتها الكولوم C، وتصف تنافر الشحنات المتشابهة وتجاذب الشحنات المختلفة بفعل القوة الكهروستاتيكية.

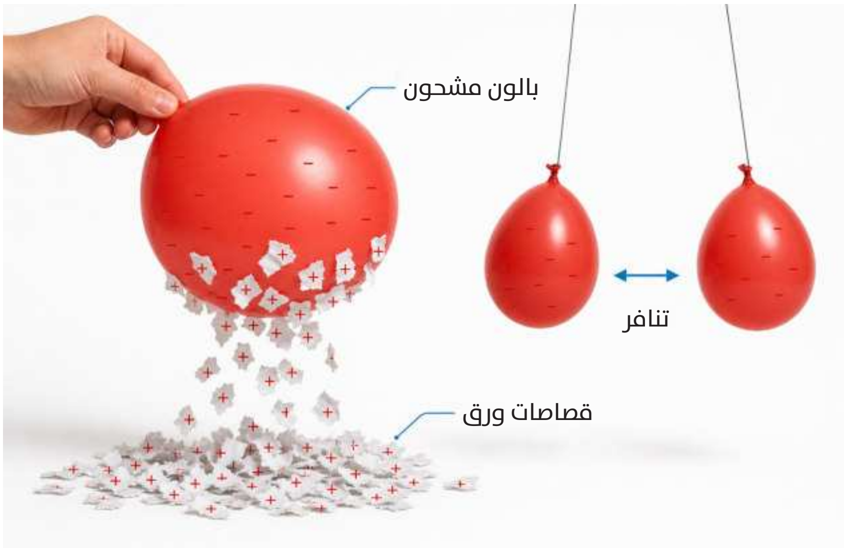
٢. يحدد قانون كولوم
$F=K\frac{|q_1 q_2|}{r^2}$ وعلاقة القوة بين نقطتين مشحونتين ومقدار كل شحنة والمسافة الفاصلة بينهما

٣. يطبق قانون كولوم مع اتزان القوى المؤثرة على كرة معلقة و مشحونة لإيجاد مقدار القوة الكهروستاتيكية أو مقدار الشحنة.

الظاهرة — تنبأ قبل أن تتابع

- **ادلك** بالونًا منفوخًا بشعرك، ثم قرّبه من قصاصات ورق صغيرة؛ تقفز القصاصات نحوه وتلتصق به من دون تلامس سابق. **وادلك** بالونين بالطريقة نفسها، ثم علّق كلًّا منهما بخيط وقرّبهما؛ ستجدهما يبتعدان أحدهما عن الآخر. إذن قد يؤدي **الدلك** (الاحتكاك) إلى تجاذب أو تنافر بحسب ما **يقترب من البالون المشحون**.

فكرة أساسية:
الشحنات المتشابهة تتنافر، والشحنات المختلفة تتجاذب. وتقاس الشحنة بالكولوم C، وتخضع لمبدأ حفظ الشحنة.



وصف الشكل 2-1-1: يرفع البالون المدلوك قصاصات الورق (الشحنات المختلفة الناتجة تنجذب)، بينما يبتعد بالونان مشحونان بشحنتين متماثلتين (الشحنات المتشابهة تتنافر).

تنبأ:

(أ) عندما يجذب البالون الورق، هل تكون شحنة البالون والشحنة المستحثة في الورق متشابهتين أم مختلفتين؟

(ب) عندما يبتعد البالونان المدلوكان، هل يحملان شحنتين متشابهتين أم مختلفتين؟

استكشف — كيف تضعف قوة الدفع مع المسافة؟

ما ستفعله: علّق كرتين خفيفتين من الفوم تحملان شحنتين متساويتين، وقِس المسافة بينهما وزاوية الخيط عند مسافات مختلفة، ثم اختبر هل تعتمد قوة التنافر على المسافة.

الزمن: 15 دقيقة.

الأدوات:

- كرتان خفيفتان من الفوم معلقتان بخيطين عازلين .
- مسطرة ومنقلة .
- ميزان لتعيين كتلة كل كرة m.
- قضيب مشحون .
- قطعة من الصوف.

قضيب مشحون

مسطرة

كرة فوم مثبتة بخيط

الخطوات:

١ ادلك كرتي الفوم بنفس الطريقة بقطعة صوف حتى تتكون شحنتين متماثلتين عليهما، ثم علّقهما بحيث تكون متجاورتين بخيطين عازلين من حامل مشترك.

٢ اتركهما حتى تستقرا متباعدتين، ثم قِس بالمسطرة المسافة r بين مركزيهما، وقِس الزاوية θ التي يصنعها كل خيط مع الرأسي.

٣ غيّر طول الخيط أو المسافة بين نقطتي التعليق، وأعد شحن الكرتين بالتساوي، ثم سجّل r وθ مرة أخرى.

٤ احسب لكل محاولة قوة التنافر $F = mg \tan \theta$، ثم حاصل الضرب $F\times r^2$، وسجّل القيم في الجدول.

المحاولة	المسافة الفاصلة r	الزاوية θ	$F = mg \tan \theta$ القوة	$F\times r^2 (N.m^2)$
1				
2				
3				

جدول النتائج:

لكل محاولة من ١ إلى ٣ سجّل المسافة r بالمتر، والزاوية θ بالدرجة، والقوة $F = mg \tan \theta$ بالنيوتن، ثم $F\times r^2$ بوحدة $N\cdot m^2$.؟

حلِّل ما جمعته:

(أ) من العمود الأخير: عند تغير r هل يظل المقدار($F\times r^2$) ثابتاً أم يتغير؟ وماذا يدل المقدار الثابت على توقف القوة F على المسافة الفاصلة r؟

(ب) أي طول حركان له الزمن الدوري الأقصر؟ ماذا يقترح هذا عن العلاقة بين الصلابة والكتلة والزمن الدوري؟

✎ **اكتب تفسيرك في سطرين قبل قراءة الجزء التالي.**

من الملاحظة إلى النموذج:

لماذا تحتاج عملية الدلك كمية خاصة بها؟

لا تؤدي عملية الدلك إلى استحضار شيء من العدم؛ فهي تنقل مقداراً قابلاً للقياس من جسم إلى آخر، ويمكن أن يكون هذا المقدار المنقول كبيراً أو صغيراً – وهو بالضبط ما يوضحه بالونٌ دُلِكَ لفترة زمنية تبلغ ضعف المدة السابقة. ولا يمكن اختزال هذا "المقدار" في الكتلة أو الطول أو الزمن؛ إذ إنه يمثل كميةً من نوعٍ خاص، ولذا فهو يتطلب وحدة قياسٍ خاصة به قبل التمكن من صياغة أي قانون بشأنه. كما أن تحديد إشارته ليس أمراً ثانوياً أو لاحقاً؛ إذ لا بد من وجود احتمالين – واثنين فقط – لتفسير النتيجتين اللتين رأيناهما في مستهل هذا الدرس: بالونٍ يجذب قصاصات الورق، وبالونين مدلوكين يتنافران ويبتعد أحدهما عن الآخر.

استخراج قانون التربيع العكسي من الجدول

تُحدد بيانات التجارب التي تجريها شكل القانون قبل صياغة أي معادلة؛ إذ تُحوَّل زاوية الخيط أولاً إلى قوة باستخدام العلاقة $F = mg\tan\theta$، ثم يأتي دور العمود الأخير في حسم الأمر: فإذا ظلت قيمة ($F\times r^2$) ثابتة تقريباً رغم تغير المسافة (r) من تجربة لأخرى، فلا يتبقى مجال لأي اعتماد آخر على المسافة؛ إذ لا بد أن تتناقص القوة وفقاً للعلاقة ($\frac{1}{r^2}$) وتكشف تجربة ثانية عن الشق الآخر من العلاقة: فعند مضاعفة شحنة كل كرة، تتضاعف قوة الجذب، مما يعني أن الشحنتين تدخلان في العلاقة كحاصل ضرب وليس كمجموع. وبجمع هاتين النتيجتين معاً، تتحدد معالم القانون بالكامل باستثناء قيمة واحدة، وهي الثابت (k)، الذي يتعين قياس قيمته تجريبياً إذ لا يمكن استنتاجها نظرياً.

تحويل الانحراف الحادث إلى قوة

لا تشير الكرة المعلقة مباشرةً إلى قيمة القوة، بل تشير إلى زاوية معينة. وتعمل ثلاث قوى على تثبيت الكرة في مكانها، اثنتان منها فقط معروفتان مسبقاً: الوزن، واتجاه قوة الشد في الخيط (دون معرفة مقدارها). ومن خلال تحليل القوى في الاتجاهين الرأسي والأفقي، تتحول حالة الاتزان الواحدة إلى معادلتين؛ وبحذف قيمة الشد المجهولة من هاتين المعادلتين، نصل إلى الصيغة:

$$F = mg\tan\theta$$

وصف الشكل 2-1-2:كرتان من الفوم تحملان شحنتين متماثلتين، معلقتان بخيطين عازلين من قضيب، وتستقران متباعدتين، وتُستخدم مسطرة لقياس المسافة r بين مركزيهما.

⭐ ملاحظة القياس:

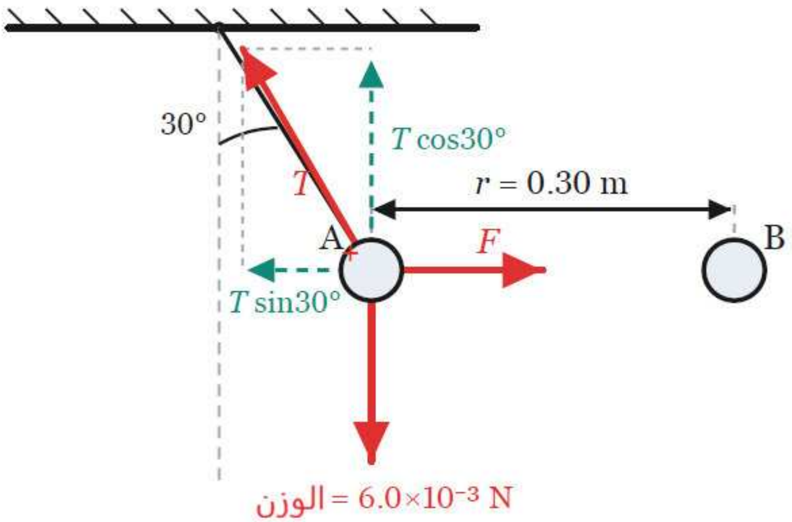
اترك الكرتين حتى تستقرا قبل القراءة، وقِس r من المركز إلى المركز، وأعد شحنهما بالتساوي في كل محاولة لأن الشحنة الساكنة تتسرب سريعًا في الهواء الرطب.

⭐ حقيقة أساسية

استخراج قانون التربيع:

يُعد الكولوم وحدة ضخمة بالمقاييس المخبرية. فعند استخدام القيمة $k = 9.0\times10^9\ N{\cdot}m^2/C^2$ نجد أن شحنتين مقدارهما 1 كولوم وتفصل بينهما مسافة متر واحد ستدفع كل منهما الأخرى بقوة مقدارها 9.0×10^9 نيوتن؛ وبالتالي، فإن قوى المليينوتن التي تُقاس باستخدام الكرات المعلقة تشير فوراً إلى أن الشحنات المعنية تمثل جزءاً ضئيلاً جداً من الكولوم.

لقد أتاحت لنا الهندسة استبدال كمية غير مرئية بأخرى يمكن قراءة قيمتها مباشرة باستخدام المنقلة (الشكل ٢-١-٣). وبمجرد تحديد قيمة القوة (F) بهذه الطريقة، تُستخدم العلاقة بالاتجاه المعاكس - أي الانتقال من القوة المقاسة إلى الشحنة المجهولة - وهي الطريقة التي استُخدمت في المثال المحلول لتحديد الشحنة الموجودة على الجسم (B).



الشكل 3-1-2 • مخطط الجسم الحر للكرة **A**: ينحرف الخيط بزاوية 30 درجة عن الخط الرأسي باتجاه الكرة **B** (التي تبعد مسافة 0.30 متر)، وبذلك تكون القوى المتوازنة هي: قوة الشد **T** (التي لها مركبتان: **T cos 30°** للأعلى و **T sin 30°** أفقياً)، والقوة الكهروستاتيكية **F** المتجهة نحو **B**، وقوة الوزن البالغة 6.0×10^{-3} نيوتن.

نقطة

! عندما يكتسب جسم ما شحنة كهربية، يُقال إنه مكهرب، ويُطلق على هذا الجسم اسم "الجسم المشحون". وتُسمى الكهرباء التي يحملها الجسم المشحون "شحنة"، بينما يُطلق على كمية هذه الكهرباء اسم "مقدار الشحنة". ووحدة قياس الشحنة هي الكولوم (ورمزها C)، ويُعبَّر عن الشحنات الموجبة والسالبة بالرمزين (+) و(-).

! تتنافر الشحنات المتشابهة وتتجاذب الشحنات المختلفة؛ وتُعرف هذه القوة باسم "القوة الكهروستاتيكية".

! تُسمى الشحنة التي يكون حجمها صغيراً لدرجة يمكن معها إهماله "شحنة نقطية".

! يتناسب مقدار القوة الكهروستاتيكية (F) [بوحدة نيوتن N] المؤثرة بين شحنتين نقطيتين طردياً مع مقدار كل من الشحنتين الكهربائيتين |q1| [بوحدة كولوم C] و |q2| [بوحدة كولوم C]، وعكسياً مع مربع المسافة (r) [بوحدة متر m] الفاصلة بين الشحنتين النقطيتين. ويُعبَّر عن ذلك بالمعادلة: $F = \frac{k|q1|\cdot|q2|}{r^2}$، وتُعرف هذه العلاقة باسم "قانون كولوم".

صندوق المعادلات:

قانون كولوم:	$F = k|q_1||q_2|/r^2$، حيث F بوحدة N و $k = 9\times10^9\ Nm^2/C^2$.
اتزان كرة معلقة:	أفقيًّا $F = T\sin\theta$، ورأسيًّا $T\cos\theta = mg$، ومنه $F = mg\tan\theta$

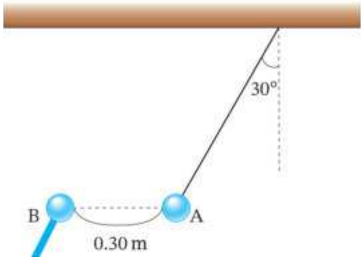
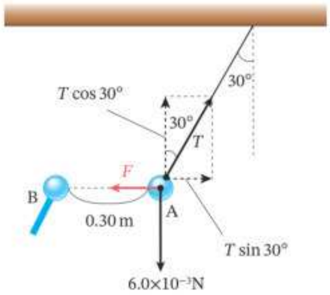
مصطلح:

حينما يتوقف النموذج - وضع القانون ليتعامل مع شحنات نقطية، وهو لا يكون موثوقاً إلا عندما تكون المسافة الفاصلة كبيرة مقارنةً بأحجام الأجسام. فإذا قُرِّبت كرتان مشحونتان بحيث تكادان تتلامسان، تقوم كل منهما بإعادة توزيع شحنة الأخرى على سطحها؛ وحينئذٍ، لا تعود المسافة المفردة (r) واصفةً لهذا التوزيع، وتختلف القوة المقاسة عن القيمة المتوقعة.

ملاحظة:

استخدم المقادير (القيم المطلقة) فقط، وليس القيم ذات الإشارة. دع الرسم التوضيحي يبيّن الاتجاه - أسهم تدفع الشحنات المتماثلة بعيداً عن بعضها، وتجذب الشحنات المختلفة نحو بعضها - وبهذا لن تُنتج تلك الحسابات إشارة سالبة مضللة.

مثال محلول:

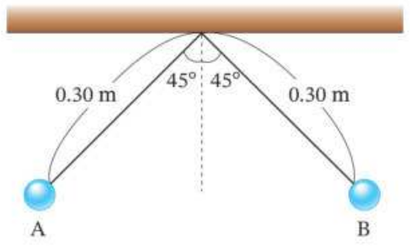
الموقف:	أُعطيت كرة صغيرة A معلقة بخيط خفيف شحنة مقدارها 2×10^{-7}C، ثم قُرّبت منها كرة صغيرة مشحونة B. استقرت الكرتان عند الارتفاع نفسه والمسافة بينهما 0.30m، وانحرف الخيط 30^o عن الرأسي. وزن A يساوي 6.0×10^{-3}N، و $k = 9\times10^9 Nm^2/C^2$، و $\sqrt{3} = 1.7$.  الشكل 4-1-2 — مثال محلول: تتدلى الكرة **A** من خيط خفيف يميل بزاوية °30 عن الاتجاه الرأسي، بينما تستقر الكرة المشحونة **B** على الارتفاع نفسه، وتبعد عن الكرة **A** مسافة **0.30 m**. (أ) عيّن القوة الكهروستاتيكية F بين الكرتين. (ب) عيّن شحنة B.
المعطيات والمطلوب:	$q_A=2\times10^{-7}$C، ووزن $A = 6.0\times10^{-3}$N، و $r = 0.30$ m، و $\theta = 30^o$، $k = 9\times10^9 Nm^2/C^2$، و $\sqrt{3} = 1.7$. المطلوب F ثم شحنة B.
التمثيل:	تتأثر الكرة A بثلاث قوى: القوة الكهروستاتيكية F أفقيًّا نحو B، والوزن إلى أسفل، وشد الخيط T في اتجاه الخيط.  T cos 30° 30° 30° T F B A 0.30 m T sin 30° 6.0×10⁻³N الشكل 5-1-2 ·مثال محلول: تحليل القوى المؤثرة على الجسم **A** — قوة الشد **T** ومركّبتاها **Tcos30°** و **Tsin30°**، والقوة الكهروستاتيكية **F**، والوزن **N** 6.0×10-3
الاستراتيجية:	نوجد F أولًا من اتزان الكرة A، ثم نستخدم قانون كولوم لإيجاد الشحنة المجهولة. ولتحديد اتجاه القوة نرسم قوة تنافر للشحنات المتشابهة وقوة تجاذب للشحنات المختلفة.
الحل الموضح:	أ) تتزن القوة الكهروستاتيكية F والوزن والشد T. أفقيًّا: $F - 0 = T\ sin30°$... (١). ورأسيًّا: $0 = T\ cos30^o - 6.0\times10^{-3}$ ... (٢). من (١)، $sin30^o = ½$، فإن $T = 2F$. وبالتعويض في (٢): $2F\ cos30^o = 6.0\times10^{-3}$، أي $\sqrt{3}F = 6.0\times10^{-3}$. إذن $F = 6.0\times10^{-3} / \sqrt{3} = 6.0\times10^{-3} / 1.7 = 3.4\times10^{-3}$ N. ب) من قانون كولوم: $F = kq_A\|q\|/r^2 = 9.0\times10^9\ \|q\| / (0.30)^2 =$. معامل $\|q\|$ يساوي $9.0\times10^9 / (0.09) = 2.0\times10^4$. ومن ثم $2.0\times10^4\times\|q\| = 3.4\times10^{-3}$، فنحصل على $\|q\| = 1.7\times10^{-7}$ C. ولأن القوة بين A وB قوة تجاذب، فإن شحنتيهما مختلفتا الإشارة. لذلك $q = -1.7\times10^{-7}$ C.

منطقية الحل:	القوة الأفقية تساوي الوزن مضروبًا في $\tan 30^o$ R 0.58، ولذلك تكون أقل قليلًا من 6.0×10^{-3} N؛ فتتفق النتيجة 3.4×10^{-3} N مع ذلك. كما أن شحنة B من رتبة 10^{-7} C وقريبة من شحنة A، وهذا يلائم قوة من رتبة الملّينيوتن عند مسافة 0.30 m.
اشرح بنفسك:	لماذا يسمح انحراف الخيط بإيجاد القوة الكهروستاتيكية قبل معرفة شحنة B؟

الآن حاول:

تحمل الكرة A المعلقة بخيط خفيف شحنة 3.0×10^{-7} C، وقُرّبت منها B حتى استقرتا عند الارتفاع نفسه والمسافة بينهما 0.30 m، وميل الخيط 30^o عن الرأسي. وزن A يساوي 6.0×10^{-6} N و $\sqrt{3} = 1.7$.

أوجد F وشحنة B.



الشكل 6-1-2٠المحاولة الأولى: كرتان كتلة كل منهما 0.50 كجم معلقتان من نقطة مشتركة بخيطين طول كل منهما 0.30 متر، وتتباعدان عند شحنهما بشحنة متماثلة.

حاول:

(١) كرتان صغيرتان A وB، كتلة كل منهما 0.50 kg، معلقتان بخيطين خفيفين طول كل منهما 0.30 m من نقطة مشتركة. عند إعطائهما مقدارًا متساويًا من الشحنة الموجبة استقرتا، بحيث يصنع كل خيط زاوية 45^o مع الرأسي. خذ $k = 9\times10^9\ Nm^2/C^2$، و $g = 10\ m/s^2$، و $\sqrt{2} = 1.4$.

(أ) عيّن القوة الكهروستاتيكية F بينهما.

(ب) عيّن شحنة الكرة A.

في سياق جديد

لأن قانون كولوم يتناقص مع مربع المسافة، فإن التغيرات الصغيرة في المسافة تغيّر القوة بشدة. إذا خُفضت المسافة بين كرتين مشحونتين إلى النصف، لا تتضاعف القوة فحسب، بل تصبح أربعة أمثالها لأن $1/r^2$ يزداد بمعامل أربعة.

وهذا الاعتماد الشديد يفسر لماذا لا يؤثر قضيب مشحون إلا قليلًا في قصاصة ورق بعيدة، بينما يجذب قصاصة قريبة بسرعة، ولماذا يتطلب إبقاء الشحنات المتشابهة متباعدة جهدًا أقل كلما اتسعت الفجوة.

دورك: تؤثر شحنتان نقطيتان إحداهما في الأخرى بقوة 0.10 N عندما تفصل بينهما مسافة 0.20 m. قدّر القوة عندما تصبح المسافة 0.10 m مع ثبات الشحنتين.

وصف الشكل 2-1-3:يرفع قضيب مشحون قصاصات الورق الواقعة تحته مباشرة، بينما تبقى القصاصات الأبعد ساكنة، موضحًا الانخفاض الحاد في قوة التجاذب الكهروستاتيكية مع المسافة.

طبيعة العلم:

من الأصل – آلات التصوير والكهرباء الساكنة. تستخدم آلة التصوير القوة الكهروستاتيكية لطباعة الحروف والصور على الورق. يصنع ضوء الليزر نمطًا غير مرئي من الشحنات الساكنة على أسطوانة تسمى المستقبل الضوئي، فتنجذب إليه حبيبات الحبر المشحونة بشحنة مضادة وتلتصق به. ثم تُنقل الصورة إلى الورق وتثبت بالحرارة.

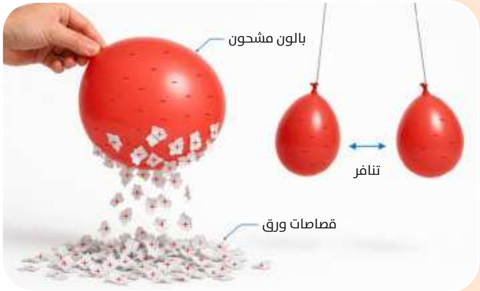
لاحظ أن القانون لا يذكر شيئاً عن المادة التي تتكون منها الأجسام، ولا عن الهواء الفاصل بينها، ولا عن الفترة الزمنية منذ دلكها. إنه يمثل نموذجاً مثالياً يُجرّد الظاهرة من كل التفاصيل التي يمكن للمُجرِّب تغييرها دون التأثير على النتيجة. تتقدم الفيزياء من خلال اكتشاف التفاصيل التي يمكن استبعادها؛ ومقياس نجاح هذا التجريد ليس كونه ينطبق حرفياً على أي كرة حقيقية في الواقع، بل قدرته على تقديم تنبؤات صحيحة باستمرار، أو الفشل في تقديمها ضمن نطاق محدد ومعروف.

لقد أثبت كولوم صحة هذا القانون تجريبياً عام 1785 باستخدام ميزان ليٍّ له حساسيته عالية، حيث استُخدم التواءُ خيطٍ ما لقياس مقدار القوة. وكان كافنديش قد توصل إلى علاقة "قانون التربيع العكسي "نفسها في وقت سابق لكنه لم ينشر نتائجه، ولذا عرف القانون باسم كولوم؛ فما يُنشر –وما يمكن تكرار التحقق منه– هو ما يدخل في أساس العلم.

دورك الآن: اقترح حالةً لا يمكن فيها التعامل مع جسمين مشحونين باعتبارهما شحنتين نقطيتين، وبيّن أيَّ افتراضٍ هو الذي يختل في هذه الحالة.

إجابة سؤال الدرس:

تؤدي عملية الدلك إلى انتقال كمية قابلة للقياس، وتكفي الحالتان المحتملتان لشحنتها لتفسير كل من حالة البالون الذي يجذب الورق وحالة البالونين اللذين يتنافران ويبتعدان عن بعضهما. وتتحدد شدة قوة الدفع أو الجذب الناتجة بناءً على مقدار الشحنة المنتقلة إلى كل جسم، وبشكل أكثر تأثيراً بكثير، بناءً على المسافة الفاصلة بينهما؛ إذ إن تقليل المسافة إلى النصف يؤدي إلى مضاعفة القوة أربع مرات. وتصلح هذه العلاقة الواحدة للتطبيق في كلا الاتجاهين: سواء للانتقال من شحنات معلومة إلى قوة متوقعة، أو للانتقال من انحراف كرة معلقة رجوعاً إلى تحديد قيمة شحنة لم يسبق قياسها مباشرة.



المشهد الذي بدأنا به

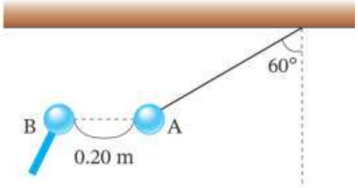
تمرين:

خذ $k = 9\times10^{9}\ \mathrm{Nm^2/C^2}$، و $g = 10\ \mathrm{m/s^2}$، و $\sqrt{2} = 1.4$، و $\sqrt{3} = 1.7$ حيث يلزم.

١) تحمل كرة صغيرة A معلقة بخيط خفيف شحنة $2.0\times10^{-7}\ \mathrm{C}$، وقُرّبت منها كرة مشحونة B. استقرتا عند الارتفاع نفسه والمسافة 0.20 m، وانحرف الخيط 60^{o} عن الرأسي. وزن A يساوي $3.0\times10^{-3}\ \mathrm{N}$.

(أ) عيّن القوة الكهروستاتيكية F بين A وB.

(ب) عيّن شحنة B.

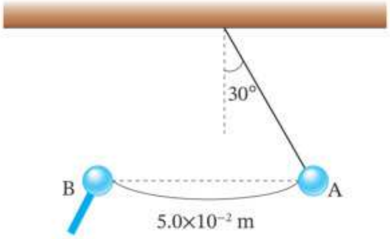


الشكل 8-1-2-٠التمرين 1: تنحرف كرة مشحونة (**A**) –معلقة بخيط خفيف– بفعل كرة مشحونة ثانية (**B**) تُقرَّب منها.

٢) أعطيت شحنة لكرة صغيرة A كتلتها 2.0×10^{-3} kg ومعلقة بخيط خفيف، وقربت منها كرة B شحنتها 4.9×10^{-7} C. استقرتا عند الارتفاع نفسه والمسافة 5.0×10^{-2} m، وانحرف الخيط 30^{o} عن الرأسي.

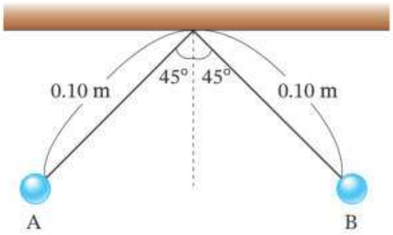
(أ) عيّن القوة الكهروستاتيكية F بين A وB.

(ب) عيّن شحنة A.



الشكل 9-1-2 • التمرين 2: الكرة **A** التي كتلتها **2.0×10^{-3} kg** معلّقة بجوار الكرة **B** التي تحمل شحنة مقدارها **4.9×10^{-7} C**، وتقع الكرتان عند الارتفاع نفسه.

٣) كرتان صغيرتان A وB كتلة كل منهما 0.25 kg، معلقتان بخيطين خفيفين طول كل منهما 0.10 m من نقطة مشتركة. عند إعطائهما مقدارًا متساويًا من الشحنة الموجبة استقرتا، بحيث يصنع كل خيط زاوية 45^{o} مع الرأسي. عيّن شحنة A.



الشكل 10-1-2 • التمرين 3: كرتان كتلتهما 0.25 كجم معلقتان بخيطين طول كل منهما 0.10 م من نقطة مشتركة، ومشحونتان بشحنة متماثلة.

الدرس ٢-٢ — المجال الكهربائي

؟ سؤال الدرس:
لماذا تؤثر القوى بين الشحنات الكهربية و بينها مسافات؟

سوف تتعلم أن

١. تعرّف المجال الكهربى E بأنه القوة المؤثرة على وحدة الشحن الموجبة، وتستخدم $F = qE$ لإيجاد القوة الكهروستاتيكية المؤثرة على شحنة q موضوعة داخل المجال.

٢. تحسب مجال شحنة نقطية من قانون كولوم $\frac{k|Q|}{r^2}$ E، وتحدد اتجاهه: إلى الخارج إذا كانت Q موجبة، ونحو الشحنة إذا كانت Q سالبة.

٣. توجد محصلة المجال الكهربى لعدة شحنات نقطية جمعًا جبريا وفق مبدأ التراكب.

الظاهرة — تنبأ قبل أن تتابع

- راقب طفلًا قرب نهاية زحليقة بلاستيكية طويلة؛ تجد خصلات شعره تتجه إلى الخارج وتتباعد وهو لا يزال يتحرك. أدى الاحتكاك بالزحليقة إلى شحن جسمه، وملأت هذه الشحنة الحيز المحيط به بالمجال الكهربى. وتحمل كل شعرة جزءًا من نفس الشحنة، فتتعرض لقوة تدفعها إلى الخارج في اتجاه المجال، من دون يد أو تلامس. لا الجسم مباشرة، فالمجال هو الذي يؤثر في أي شحنة توجد فيه.

مشحونة بفعل الزحليقة

وصف الشكل 2-2-1: قرب نهاية زحليقة بلاستيكية طويلة يشحن الاحتكاك جسم الطفل، فتملأ شحنته الحيز المحيط بمجال كهربائي، وتتأثر كل شعرة مشحونة بقوة تدفعها إلى الخارج.

تنبأ:

(أ) توضع شحنة اختبار موجبة صغيرة في المجال المحيط بجسم الطفل المشحون. هل تتجه القوة المؤثرة فيها مع المجال أم عكسه؟

(ب) إذا زاد مقدار شحنة الاختبار إلى الضعف، فماذا يحدث للقوة المؤثرة عليها؟

فكرة أساسية:
المجال الكهربائي
— E [N/C]
هو ما تؤثر به الشحنة في الحيز المحيط بها. ما مقدار القوة المؤثرة على شحنة q موضوعة في ذلك الحيز، وما هو اتجاهها؟

مصطلح:
المجال الكهربائي – هو المفهوم التحليلي (أو الأداة الوصفية) الذي يبنيه هذا الدرس. فبدلاً من التساؤل عما تفعله شحنةٌ ما بشحنةٍ أخرى عبر مسافة فاصلة، ينبغي التساؤل عن الحالة التي تُحدثها الشحنة الأولى عند كل نقطة محيطة بها؛ إذ إن أي جسم يُوضع في تلك النقطة لاحقاً يستجيب فقط للحالة السائدة في الموقع الذي استقر فيه.

استكشف — كيف يقل تأثير مجال قضيب مشحون مع المسافة؟

ما ستفعله: استخدم شحنة اختبار خفيفة معلقة بخيط لقياس تناقص قوة الجذب أو الدفع الجانبية لقضيب مشحون عند الابتعاد عنه، لتكتشف أن المجال يقل وفقا للعلاقة .

الزمن: 15 دقيقة.

الأدوات:

- قضيب بلاستيكي وقطعة قماش لشحنه .
- كرة مغطاة برقائق معدنية ومعلقة بخيط رفيع لتعمل شحنة اختبار .
- حامل لتثبيت القضيب رأسيًا .
- مسطرة لقياس المسافة والإزاحة الجانبية.

مسطرة

كرة اختبار على خيط

قضيب مشحون

الخطوات:

١ ادلك طرف القضيب البلاستيكي (السنتيمترات القليلة العليا فقط) بقطعة القماش. لا تنتقل الشحنة على طول العازل، فتبقى مركزة قرب الطرف وتتصرف كشحنة نقطية واحدة. ثبّت القضيب رأسيًا.

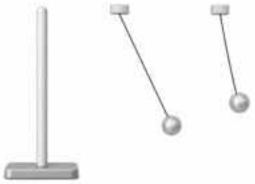
٢ لامس الكرة المغطاة بالرقائق بالقضيب المشحون للحظة قصيرة حتى تكتسب شحنة صغيرة من النوع نفسه، ثم اتركها معلقة بحرية. ولتشابه الشحنتين يبتعد الخيط عن القضيب.

٣ اجعل شحنة الاختبار عند مستوى الطرف المشحون وعلى مسافة أفقية منه مقدارها r، ثم قِس بالمسطرة الإزاحة الجانبية d للخيط، واحسب $d \times r^2$.

٤ أعد شحن الطرف وكرر القياس عند مسافتين أكبر مع استخدام نفس الكرة والخيط .

المحاولة	المسافة الفاصلة r	والإزاحة الجانبية d بالسنتيمتر بوصفها مقياسًا للقوة		$d \times r^2$
1				
2				
3				

اكتب تفسيرك في سطرين قبل قراءة الجزء التالي.


وصف الشكل 2-2-2:كرة مغطاة بالرقائق ومعلقة بخيط، شُحنت بملامسة القضيب فأصبحت شحنة اختبار من النوع نفسه. بالقرب من القضيب يكون انحراف الخيط كبيرًا، وعند الابتعاد يقل الانحراف، فيوضح اتجاه المجال وشدته.

ملاحظة القياس:
أعد شحن الطرف قبل كل محاولة لضمان بقاء الشحنة (Q) ثابتة، وقِس مقدار الإزاحة الجانبية (d) بعد استقرار الخيط وتوقفه عن الحركة. تعبّر هذه الإزاحة عن القوة طالما ظلت قيمتها صغيرة مقارنةً بطول الخيط؛ لذا احرص على إجراء جميع المحاولات ضمن هذا النطاق.

حلّل البيانات التي جمعتها:

(أ) ماذا يحدث لمقدار الانحراف **d** كلما زادت المسافة **r**؟ قارن بين القيم الثلاث التي حصلت عليها للمقدار $d \times r^2$؛

— هل تظل هذه القيم ثابتة تقريباً؟

(ب) يعبّر الانحراف d عن القوة، وتتناسب القوة طردياً مع المجال. إذا كان المقدار $d\times r^2$ ثابتاً تقريباً، فماذا يخبرك ذلك عن طبيعة اعتماد المجال على المسافة r؟

— وكيف يتوافق ذلك مع العلاقة $E = k|Q|/r^2$؟

ملاحظة القياس:
اترك الكرتين حتى تستقرا قبل القراءة، وقِس r من المركز إلى المركز، وأعد شحنهما بالتساوي في كل محاولة لأن الشحنة الساكنة تتسرب سريعًا في الهواء الرطب.

من الملاحظة إلى النموذج:

لماذا يستحق الأمر ابتكار "وسيط"؟

لا يتطرق قانون كولوم -الذي تناولناه في الدرس السابق- إلى مسألة الفراغ الفاصل بين الشحنتين؛ فهو يربط القوة بشحنتين وبالمسافة الفاصلة بينهما، وكأن كل جسم يمد تأثيره عبر الفراغ ليمسك بالجسم الآخر لحظياً. وهذا المفهوم يثير حفيظة علماء الفيزياء؛ لذا يتمثل البديل في تقسيم تلك العبارة الواحدة إلى شقين: حيث تُحدث الشحنة الأولى تغييراً في الحيز المحيط بها، ثم تتفاعل الشحنة الثانية مع ما تجده في موقعها. وفي هذه العملية، لا يلزم انتقال أي شيء بين الجسمين لإتمام الخطوة الثانية؛ إذ يكفي أن تكون الشحنة الثانية على دراية بما يحيط بها مباشرة.

فصل شحنة الاختبار

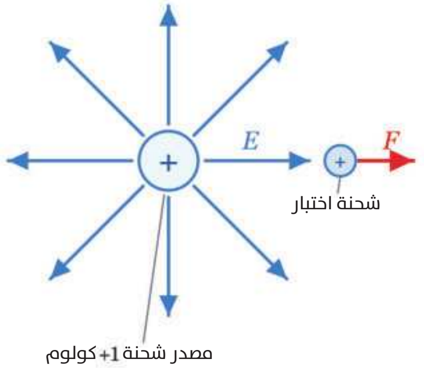
لا تكتسب عملية الفصل هذه جدواها إلا إذا أمكن وصف الخطوة الأولى دون الإشارة إطلاقاً إلى الجسم الثاني؛ وهذا أمر ممكن بالفعل. لنفترض وضع شحنة صغيرة (q) عند نقطة مختارة وقياس القوة المؤثرة عليها، ثم تكرار التجربة باستخدام شحنة مضاعفة؛ سنجد أن القوة تتضاعف، لكن النسبة (F/q) تظل ثابتة. وهذا الثبات هو جوهر الحجة بأكملها؛ فالمقدار الذي يتبقى بعد قسمة القوة على شحنة الاختبار يخص النقطة نفسها، لا الجسم الذي وُضع هناك لاستكشافها، ومن ثم يمكن تدوين قيم النسبة (F/q) في جداول واستخدامها لأي شحنة لاحقة. ويجب أن تكون هذه النسبة كمية متجهة لأن القوة التي تعبّر عنها هي كمية متجهة؛ وبما أن الشحنة السالبة (q) تعكس اتجاه القوة دون أن تغير دلالة النسبة، فإن إشارة الشحنة وحدها هي التي تحدد اتجاه الدفع (الشكل ٢-٢-٣)..

من شحنة واحدة إلى شحنات متعددة

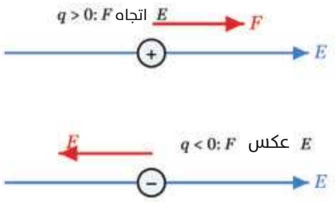
أصبح تطبيق عملية القسمة ذاتها على قانون كولوم أمراً ميكانيكياً بحتاً: فبقسمة طرفي المعادلة $F = k|Q||q|/r^2$ على شحنة الاختبار q، تختفي هذه الشحنة من الطرف الأيمن، وتتبقى كمية تعتمد فقط على الشحنة المصدرية Q وعلى المسافة الفاصلة. وتُستمد اتجاهية هذه الكمية من اتجاه القوة المؤثرة على شحنة اختبار موجبة؛ إذ تندفع الشحنة بعيداً عن المصدر الموجب وتنجذب نحو المصدر السالب (الشكل ٢-٢-٤).

ويمكن التعامل مع وجود عدة مصادر للشحنة بالسهولة ذاتها؛ إذ تُجمع القوى المؤثرة على شحنة الاختبار جمعاً اتجاهياً -وهذا يندرج ضمن الميكانيكا التقليدية وليس قانوناً جديداً- وعند قسمة كل حد من حدود هذا المجموع الاتجاهي على المقدار q نفسه، تظل المساهمات الفردية تُجمع بالطريقة ذاتها تماماً. ولهذا السبب يُعد إنشاء متوازي الأضلاع -الموضّح في المثال المحلول- إجراءً صحيحاً، كما يفسر ذلك كيف يمكن لمجالات متساوية في المقدار أن تلغي بعضها تماماً في اتجاه معين، بينما تعزز بعضها البعض في اتجاه آخر.

حقيقة أساسية:
نيوتن لكل كولوم (N/C) هي الوحدة الناتجة عن قسمة القوة على الشحنة. وفي الدرس الذي يلي الدرس القادم ستصادف الكمية نفسها مكتوبةً بالصيغة V/m؛ وهما تمثلان الوحدة ذاتها ولكن بمسميات مختلفة .



وصف الشكل 2-2-3:كرة مغطاة بالرقائق ومعلقة بخيط، شُحنت بملامسة القضيب فأصبحت شحنة اختبار من النوع نفسه. بالقرب من القضيب يكون انحراف الخيط كبيرًا، وعند الابتعاد يقل الانحراف، فيوضح اتجاه المجال وشدته.



الشكل 2-2-4 • في المجال نفسه **E**، تتأثر الشحنة الموجبة بقوة **F** في اتجاه المجال، بينما تتأثر الشحنة السالبة بقوة على الخط نفسه ولكن في الاتجاه المعاكس.

نقطة

- تُعرف خاصية الحيز (أو الفراغ) التي تؤثر بقوة على شحنة كهربية باسم **المجال الكهربي**. والمجال الكهربي هو كمية متجهة لها مقدار واتجاه.
- يتحدد المجال الكهربي (E) عند أي نقطة في الحيز من خلال القوة التي ستؤثر على شحنة موجبة مقدارها الوحدة (شحنة اختبار موجبة) إذا وُضعت عند تلك النقطة.

  مقدار المجال الكهربي (E) ... هو مقدار القوة المؤثرة على شحنة موجبة مقدارها الوحدة.

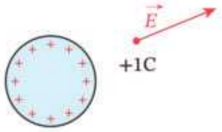
  اتجاه المجال الكهربي (E) ... هو اتجاه القوة المؤثرة على شحنة موجبة مقدارها الوحدة.
- يُحسب مقدار القوة الكهروستاتيكية (F) [بوحدة نيوتن N] المؤثرة على شحنة (q) [بوحدة كولوم C] موضوعة عند نقطة شدة المجال الكهربي فيها تساوي (E) [بوحدة نيوتن/كولوم N/C] بالعلاقة: $F = qE$
- تتأثر الشحنة الموجبة بقوة كهروستاتيكية في اتجاه المجال الكهربي، بينما تتأثر الشحنة السالبة بقوة كهروستاتيكية في الاتجاه المعاكس لاتجاه المجال الكهربي.
- تُحسب شدة المجال الكهربي (E) [بوحدة N/C] الناشئ عن شحنة نقطية مقدارها (Q) [بوحدة C] عند مسافة (r) [بوحدة m] باستخدام قانون كولوم: $E = k|Q|/r^2$
- عند وجود عدة شحنات نقطية، يمكن جمع مجالاتها الكهربية باستخدام مبدأ التراكب ويكون اتجاه المجال الكهربي نحو الخارج مبتعداً عن الشحنة النقطية عندما تكون (Q) موجبة، نحو الداخل باتجاه الشحنة النقطية عندما تكون (Q) سالبة

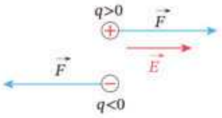
صندوق المعادلات:

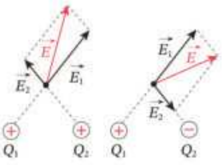
المجال والقوة:	$F = qE$، ومنه $E = F/q$، ووحدة المجال N/C.
مجال شحنة نقطية:	$E = k\|Q\|/r^2$؛ إلى الخارج إذا كانت $Q > 0$، وإلى الداخل إذا كانت $Q < 0$
التراكب:	$\vec{E} = \vec{E}1 + \vec{E}2 + \dots$، أي المجموع المتجهي للمجالات المنفصلة

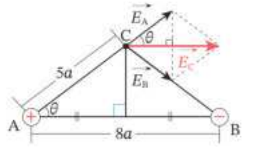
ملاحظة:

يجب أن يكون المسبار صغيراً بدرجة تكفي لعدم التأثير على ما يقوم بقياسه؛ إذ تؤدي شحنة المسبار الكبيرة إلى إزاحة شحنات المصدر نفسه، وبذلك تصف القراءة التي حصل عليها ترتيباً أنتَ من أحدثه، بدلاً من الترتيب الذي كنتَ تنوي فحصه.



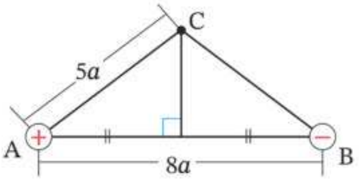




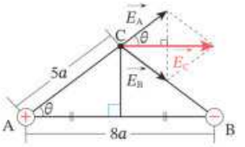


وصف الشكل 2-2-6: مثال محلول: عند النقطة C يكون مجال الشحنة الموجبة عند A ومجال الشحنة السالبة عند B متساويين في المقدار، لذا فإن مركباتهما الرأسية تلغي بعضها البعض ويكون المجال الكهربائي الناتج موازياً لـAB.

مثال محلول:

الموقف:	(أ) وُضعت شحنة نقطية مقدارها $-4.0\times10^{-10}C$ عند موضع ما، فتأثرت بقوة كهروستاتيكية مقدارها $8.0\times10^{-8}N$ إلى اليمين. عيّن اتجاه المجال الكهربائي وشدته E عند هذا الموضع.  الشكل 5-2-2 — مثال محلول (**b**): من الشكل الأصلي، نركز هنا على الهندسة فقط: توجد شحنة موجبة **+q** عند النقطة **A**. توجد شحنة سالبة **-q** عند النقطة **B**. * المسافة بين الشحنتين **8a**. تقع النقطة **C** على المنصف العمودي للمسافة **AB**. المسافة من **C** إلى كل من الشحنتين **A** و**B** تساوي **5a** (ب) المسافة بين نقطتين A وB تساوي 8a، ووُضعت +q عند A و-q عند B. عيّن اتجاه المجال CE وشدته عند نقطة C على العمود المنصف لـAB، حيث AC = BC = 5a. خذ ثابت كولوم k.
المعطيات والمطلوب:	(أ) $q = -4.0\times10^{-10}C$، و$F = 8.0\times10^{-8}N$ إلى اليمين؛ المطلوب اتجاه E وشدته. (ب) +q عند A و-q عند B، و$AB = 8a$، و$AC = BC = 5a$؛ المطلوب CE عند C.
التمثيل	في الحالة (**a**)، تكون الشحنة سالبة، ولذا فإن القوة والمجال يشيران إلى اتجاهين متعاكسين. أما في الحالة (**b**)، فانظر الشكل 6-2-2: نظراً لأن **AC = BC = 5a** وأن نصف طول **AB** يساوي **4a**، فإن المسافة العمودية من **C** إلى **AB** تساوي **3a** (وفقاً لخصائص المثلث القائم الزاوية بأبعاد 3-4-5)، ويُشكّل كل من **EA** و**EB** ضلعين من أضلاع مُعيّن.
الاستراتيجية:	نستخدم $F = qE$ بالمقادير فقط، ونحدد الاتجاه من إشارة الشحنة. وفي حالة الشحنتين نحسب مجال كل شحنة من $E = k\|Q\|/r^2$ ثم نجمع المجالين جمعًا متجهيًّا.
الحل الموضح:	أ) الشحنة سالبة، ولذلك تكون القوة عكس المجال. ولأن القوة إلى اليمين فإن المجال يتجه إلى اليسار. وبالمقادير: $8.0\times10^{-8} = 4.0\times10^{-10}\times E$. إذن $E = (8.0\times10^{-8}) \div (4.0\times10^{-10}) = 2.0\times10^{2}$ N/C إلى اليسار. ب) يتجه المجال E_A عند C الناتج عن الشحنة عند A من A إلى C، وشدته $kq/(5a)^2$. ويتجه E_B الناتج عن الشحنة عند B من C نحو B، وبالشدة نفسها. وبسبب التماثل تلغي المركبتان العموديتان إحداهما الأخرى، وتجمع المركبتان الموازيتان لـAB، فتتجه المحصلة من A إلى B. لنفترض أن $\theta c = CAB$. وبسبب التماثل، فإن $EC = EA \cos\theta \times 2$. وبما أن $\cos\theta = 4a/5a = 4/5$، فإن، $EC = k\cdot q/(5a)^2 \times (4/5) \times 2 = 8kq/(125a^2)$ [N/C]. ويكون الاتجاه من A إلى B.

منطقية الحل:	أ) مجال شدته 2.0×10^{2} N/C يؤثر في شحنة مقدارها 4.0×10^{-10} C بقوة 8.0×10^{-8} N، وهي القوة المعطاة. **ب**) للشحنتين المقدار نفسه وتبعدان 5 a عن C، فتتساوى شدة المجالين؛ تلغى المركبتان العموديتان وتُجمع المركبتان على AB، فتتفق المحصلة مع $8\ \mathrm{kq}/125\mathrm{a}^{2}$).
اشرح بنفسك:	لماذا يتجه المجال في: (أ) عكس القوة؟ ولماذا تقع محصلة المجال في (ب) على الخط AB لا عموديًّا عليه؟



وصف الشكل 2-2-7
الحالة 4: شحنة نقطية q^- عند A وشحنة q^+ عند B، تفصل بينهما مسافة 2a.

الآن حاول:

توضع شحنة نقطية موجبة مقدارها 5.0×10^{-9} C في مجال شدته 3.0×10^{3} N/C إلى اليمين. أوجد مقدار القوة المؤثرة فيها واتجاهها.

حاول:

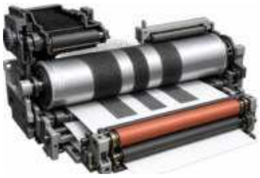
(١) وضعت شحنة نقطية مقدارها 2.0×10^{-9} C عند موضع ما، فتأثرت بقوة كهروستاتيكية مقدارها 4.0×10^{-6} N إلى اليمين. عيّن اتجاه المجال وشدته عند هذا الموضع.

(٢) وضعت شحنة نقطية مقدارها -3.0×10^{-6} C في مجال شدته 1.6×10^{3} N/C إلى اليمين. عيّن مقدار القوة الكهروستاتيكية واتجاهها.

(٣) عيّن شدة المجال الذي تنشئه شحنة نقطية مقدارها 5.0×10^{-8} C عند نقطة P تبعد 0.30 m، وحدد هل يتجه المجال شعاعيًا إلى الخارج أم إلى الداخل. خذ $k = 9.0\times10^{9}\ \mathrm{N.m^2/C^2}$.

(٤) المسافة بين A وB تساوي 2a. وُضعت -q عند A و+q عند B. عيّن اتجاه المجال EC وشدته عند C الواقعة على العمود المنصف لـAB وعلى مسافة a من منتصف AB. خذ ثابت كولوم k، ويمكن ترك الإجابة في صورة جذرية.

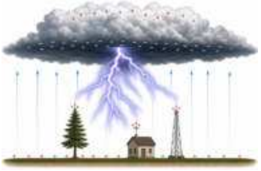
في سياق جديد



وصف الشكل 2-2-8: داخل طابعة ليزر تنجذب حبيبات الحبر الدقيقة انتقائيًا إلى الأشرطة المشحونة على الأسطوانة الدوارة، ثم تنتقل في نمط مطابق إلى الورقة المارة أسفلها.

توجه طابعات الليزر وآلات التصوير الحبر باستخدام المجالات الكهربائية. تُعطى حبيبات الحبر الدقيقة شحنة صغيرة، ثم تُطلق قرب أسطوانة دوارة تحمل نمطًا من الشحنات. يؤثر المجال حول الأسطوانة في كل حبيبة بقوة $F = qE$، فيجذب الحبر المشحون بدقة إلى المناطق التي ستكوّن الصورة المطبوعة قبل تسخين الورق لتثبيته.

طبيعة العلم:



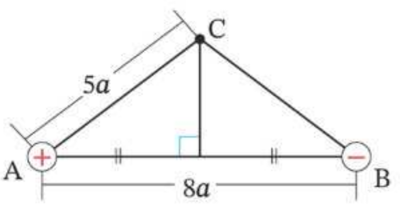
وصف الشكل 2-2-9: تتجمع الشحنة السالبة عند قاعدة السحابة وتتجمع الشحنة الموجبة على الأرض، ويشتد المجال بينهما حتى ينهار عزل الهواء ويحدث تفريغ البرق.

لنعد إلى الأصل: البرق هو أيضاً تفريغ للكهرباء الساكنة.

البرق عبارة عن "تفريغ" تتدفق فيه فجأةً عبر الهواء شحناتٌ كهربائية ساكنة تراكمت داخل السحب. إذ تحتك جزيئات الجليد داخل السحب ببعضها البعض فتتولد كهرباء ساكنة، وتتجمع الشحنات السالبة عند قاعدة السحب؛ وهذا يجذب بقوة الشحنات الموجبة الموجودة على سطح الأرض، فيزداد المجال الكهربائي بين السحابة والأرض لدرجة تؤدي إلى تأين الهواء (انهيار عازليته) وتدفق تيار هائل، وهذا هو البرق.

يُعد المجال الكهربائي نموذجاً علمياً؛ فنحن لا نستطيع رؤية "خاصية الحيز المكاني" هذه بحد ذاتها، ولكن من خلال تعريفها استناداً إلى القوة المؤثرة على شحنة موجبة مقدارها الوحدة، يمكننا التنبؤ – بمعادلة واحدة – بالقوة المؤثرة على أي شحنة في أي مكان. ويكتسب النموذج مصداقيته

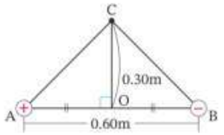
عندما تؤدي فكرة غير مرئية – كالمجال – إلى تنبؤات قابلة للقياس والاختبار، مثل تحديد مكان وزمان حدوث الانهيار الكهربائي للهواء أثناء العاصفة.



رسم فاراداي خطوط القوة في ثلاثينيات القرن التاسع عشر دون الاستعانة تقريباً بأي رياضيات، ورفض البعض هذا التصور لهذا السبب بالتحديد؛ ثم صاغها ماكسويل في صورة معادلات، فأصبحت اللغة القياسية لهذا المجال العلمي. إذ يمكن للتصور الفيزيائي أن يظهر قبل صياغته الرياضية، ومع ذلك يظل هو التصور الصحيح.

دورك الآن: اقترح ملاحظة من الحياة اليومية تتيح لك معرفة اتجاه المجال الكهربائي لجسم مشحون دون الحاجة إلى لمسه.

دورك: اقترح ملاحظة يومية تمكّنك من تحديد اتجاه مجال جسم مشحون من دون لمسه.



الشكل 2-2-10 تمرين 4: شحنتان مقدارهما 2.0×10^{-8} C عند النقطة A و -2.0×10^{-8} C عند النقطة B، تفصل بينهما مسافة 0.60 m، وتقع النقطة C على المنصف العمودي.

إجابة سؤال الدرس:

مشحونة بفعل الزحليقة

المشهد الذى بدأنا به

لا تؤثر الشحنة عبر الفراغ مباشرة؛ بل تملأ الحيز المحيط بها بمجال كهربائي، وتستجيب أي شحنة ثانية لهذا المجال حيث موضعها فيه. مجال الشحنة النقطية $E = k|Q|/r^2$، ويتجه إلى الخارج في حالة Q الموجبة وإلى الداخل للسالبة. ويؤثر المجال في الشحنة q بقوة $F = qE$، يكون اتجاهها مع المجال أو عكسه بحسب إشارة الشحنة q؛ ومن ثم تؤثر الشحنات المتباعدة بعضها في بعض.

تمرين:

١) وُضعت شحنة نقطية مقدارها -2.0×10^{-10} C عند موضع ما، فتأثرت بقوة كهروستاتيكية مقدارها 6.0×10^{-8} N إلى اليمين. عيّن اتجاه المجال وشدته عند هذا الموضع.

٢) وُضعت شحنة نقطية مقدارها 2.0×10^{-6} C في مجال شدته 1.4×10^{-6} N/C إلى اليمين. عيّن مقدار القوة الكهروستاتيكية واتجاهها.

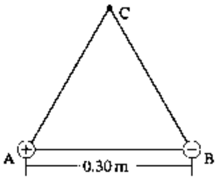
٣) عيّن شدة المجال عند نقطة P تبعد 2.0 m عن شحنة نقطية مقدارها 8.0×10^{-6} C، وحدد هل يتجه إلى الخارج أم إلى الداخل. خذ $k = 9.0\times109$ $N.m^2/C^2$.

٤) المسافة بين A و B تساوي 0.60 m. وُضعت شحنة 2.0×10^{-8} C عند A وشحنة -2.0×10^{-8} C عند B. تقع C على العمود المنصف لـ AB وتبعد 0.30 m عن المنتصف O. خذ $k = 9.0\times10^9$ $N.m^2/C^2$ و $\sqrt{2} = 1.4$.

(أ) عيّن اتجاه المجال E_O وشدته عند O.

(ب) عيّن اتجاه المجال E_C وشدته عند C.

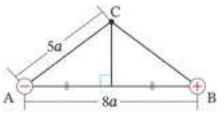
(ج) إذا أصبحت شحنة B موجبة 2.0×10^{-8} C، فعيّن اتجاه EC وشدته عند C.



الشكل 2-2-11 تمرين 5: مثلث متساوي الأضلاع ABC طول ضلعه 0.30 متر، توجد شحنة مقدارها 4.0×10^{-8} كولوم عند الرأس A وشحنة مقدارها -4.0×10^{-8} كولوم عند الرأس B.

٥) في مثلث متساوي الأضلاع ABC طول ضلعه 0.30 m، وُضعت شحنة 4.0×10^{-8} C عند A وشحنة -4.0×10^{-8} C عند B. عيّن اتجاه المجال EC وشدته عند C. خذ $k = 9.0\times10^9$ $N.m^2/C^2$.

٦) المسافة بين A و B تساوي 8a. وُضعت -q عند A و +q عند B. عيّن اتجاه المجال EC وشدته عند C على العمود المنصف لـAB، حيث $AC = BC = 5a$. خذ ثابت كولوم k .



الشكل 2-2-12 تمرين 6: توجد شحنة مقدارها q– عند النقطة A وشحنة مقدارها q+ عند النقطة B، وتفصل بينهما مسافة: 8a وتقع النقطة C على المنصف العمودي للخط الواصل بينهما، بحيث تكون المسافة من C إلى كل من A و B تساوي 5a.

الدرس ٢-٣ — الجهد الكهربائي

؟ سؤال الدرس:

كيف يكسب المجال (الحيز) الموضوع فيه شحنة ما طاقة وضع كهربية مثل طاقة الوضع المكتسبة لجسم نتيجة ارتفاعه فى مجال الجاذبية الارضية؟

ستتعلم أن

١. بيّن أن الجهد الكهربائي عند نقطة ما هو طاقة الوضع لشحنة موجبة مقدارها الوحدة موضوعة عند تلك النقطة، ويُقاس بوحدة الفولت (V).

٢. احسب طاقة الوضع لشحنة باستخدام العلاقة $U = qV$، بوحدة الجول (J).

٣. أوجد الشغل الذي تبذله القوة الكهروستاتيكية عند انتقال شحنة بين نقطتين، باستخدام العلاقة $W = qVA - qVB$.

الظاهرة — تنبأ قبل أن تتابع

عندما تسحب قدميك فوق سجادة في يوم جاف ثم تلمس مقبض باب معدني، تنتج شرارة صغيرة نحو طرف إصبعك مصحوبةً بصوت طقطقة؛ فعملية سحب القدمين هذه أدت إلى تراكم شحنة إضافية عليك، مما رفع جهدك الكهربي إلى مستوى عالٍ. وحين تقترب يدك من المقبض المتصل بالأرض، تندفع تلك الشحنة عبر الفاصل الهوائي نحو منطقة ذات جهد أقل بكثير، وتُفرّغ طاقتها المخزنة على هيئة شرارة. فالشحنة الكهربية -تماماً كالثقل المرفوع- تحمل طاقةً تتحدد قيمتها بناءً على موقعها داخل المجال.

فكرة أساسية:

الجهد الكهربي V هو طاقة الوضع الكهروستاتيكية لكل وحدة شحنة موجبة، ويقاس بالفولت: حيث $1\,V = 1\,J/C$.

وصف الشكل 2-3-1: تقفز شرارة من إصبع مشحون إلى مقبض باب متصل بالأرض؛ فتحرر الشحنة التي رُفعت إلى جهد مرتفع طاقتها المختزنة عند انتقالها إلى جهد أقل.

تنبأ:

(أ) إذا نقلتَ شحنة موجبة صغيرة من نقطة ذات جهد عالٍ إلى نقطة ذات جهد منخفض، فهل تبذل القوة الكهروستاتيكية شغلاً موجباً أم سالباً؟

(ب) وإذا دفعتَ تلك الشحنة الموجبة -بدلاً من ذلك- نحو نقطة ذات جهد أعلى، فمن الذي يبذل الشغل: المجال أم يدك.

استكشف – رسم خريطة الجهد على ورقة موصّلة

ما ستفعله: قِس تغير قراءة الفولتميتر خطوة بخطوة عبر ورقة موصّلة، لتكشف أن المجال الكهربائي يكون أشد حيث يتغير الجهد بأسرع معدل مع المسافة.

الزمن: 20 دقيقة.

الأدوات:

- ورق موصل عليه قطبان.
- بطارية جهدها صغير.
- فولتميتر.
- مسطرة.

مسطرة

فولتميتر

بطارية

ورق موصل

الخطوات:

١ صِل القطبين على الورقة الموصّلة بالبطارية حتى ينشأ مجال كهربى ثابت خلال الورقة.

٢ ضع أحد طرفى توصيل الفولتميتر على القطب A ليكون مرجعًا ثابتًا، وضع المسطرة على الخط المستقيم الواصل بين القطبين.

٣ حرّك الطرف الثانى بمسافات متساوية x على طول الخط، وسجّل قراءة الجهد V عند كل خطوة. واحسب لكل فترة معدل تغير الجهد مع المسافة ΔV/Δx.

٤ تحرك جانبيًا وابحث عن نقاط أخرى تعطى نفس القراءة، ثم صِل بينها لتحصل على خط تساوى الجهد.

٥ أضف مزيدًا من العملات، واترك النظام ليبلغ وضع اتزانه الجديد، وكرر القياس.

٦ عُد إلى الحمل الأول. كرر القياس باستخدام إزاحة ابتدائية صغيرة ثم إزاحة ابتدائية أكبر، مع إبقاء الكتلة دون تغيير.

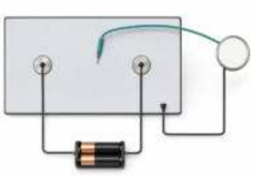
المحاولة	المسافة X بالسنتيمتر	قراءة الفولتميتر V بالفولت	ΔV/Δx بوحدة V/cm

حلّل ما جمعته:

(أ) من العمود ΔV/Δx: هل يزداد الجهد بنفس المقدار فى كل خطوة أم بقيمة أكبر فى منطقة معينة؟ وأين تبلغ النسبة (ΔV/Δx) أكبر قيمة؟

(ب) تكون شدة المجال الكهربى أكبر ما يمكن حيث تكون النسبة (ΔV / Δx) أكبر. تنبأ بموضع ازدحام خطوط تساوى الجهد، وفسر لماذا لا يتطلب تحريك شحنة على خط تساوى الجهد شغلًا.

اكتب تفسيرك فى سطرين قبل قراءة الجزء التالى.


وصف الشكل 2-3-2: قطبان على ورقة موصلة موصلان ببطارية، ويظل أحد مسباري الفولتميتر عند مرجع ثابت بينما يتحرك الآخر فوق الورقة لتحديد نقاط الجهد المتساوى.

ملاحظة القياس:
اضغط بقوة على القطب (A) وثبّته في مكانه عند أخذ كل قراءة؛ إذ يؤدى عدم إحكام التلامس إلى إزاحة العمود بأكمله. اقرأ قيمة الجهد (V) مع إبقاء الطرف المتحرك ثابتاً في وضع عمودى

من الملاحظة إلى النموذج:

لماذا لا تُعد قواعد الرسم مجرد اصطلاحات:

لا تكون صورة المجال مفيدة إلا إذا كانت صادقة (غير قابلة للكذب)، ويتبين أن كل قاعدة من قواعد رسمها تُفرض فرضاً ولا تخضع للاختيار؛ فعند أي نقطة محددة، يدفع توزيع الشحنات جسيم الاختبار في اتجاه واحد لا غير، ولو التقى منحنيان عند تلك النقطة لكان على الجسيم أن يتبع اتجاهين في آن واحد — وهو أمر لم تظهره أي قياسات أخرى — وكذلك الحال لو انقسم المنحنى إلى فرعين. وتتحدد المسافات الفاصلة بالقدر ذاته من الحتمية؛ فإذا تتبعتَ كل منحنى ينطلق من كرة صغيرة تحيط بشحنة ما، اتبع كل منحنى تاركًا كرة صغيرة حول الشحنة ونفس الشيء، لا بد أن تنتشر مجموعة منها على سطح كرة أكبر تقع على مسافة أبعد؛ فتوزُّع الكمية ذاتها على مساحة أوسع هو بالضبط ما يعنيه تضاؤل قوة الدفع. وعليه، فإن التزاحم ليس مجرد إشارة شكلية تدل على القوة، بل هو القوة ذاتها وقد تجسدت في هيئة مرئية.

ملاحظة:

هذه المنحنيات مجرد رسم توضيحي، وليست اكتشافاً. لا شيء يمر عبر الفضاء ولا شيء ينتقل على امتدادها. ارسم ضعف عددها وسيظل الترتيب كما هو؛ فالمعنى يكمن فقط في التزاحم النسبي من موضع لآخر.

القسمة على شحنة الاختبار مرة أخرى:

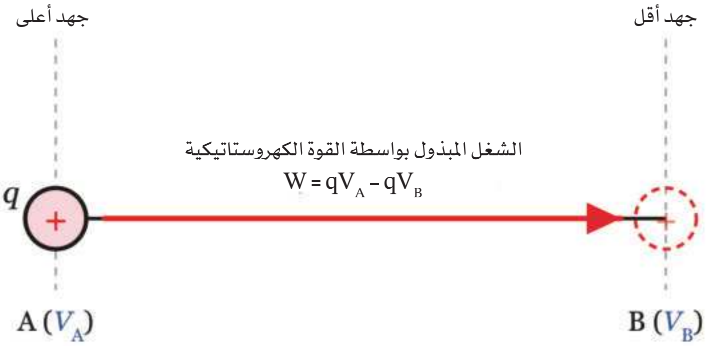
في الدرس السابق، قمنا بقسمة القوة على شحنة اختبار لنستخلص بذلك مقداراً يخص النقطة ذاتها. وينطبق الأمر ذاته تماماً على الطاقة؛ فعند نقل شحنة اختبار إلى نقطة محددة، تُختزن فيها طاقة، وإذا نُقلت شحنة تعادل ضعف تلك الشحنة عبر المسار نفسه، فإن الطاقة المختزنة تتضاعف أيضاً. ومن ثم، فإن نسبة الطاقة المختزنة إلى الشحنة تظل مستقلة عن طبيعة الشحنة المنقولة، ويمكن تسجيل قيمتها في جداول خاصة بتلك النقطة وحدها. ونظراً لأن الطاقة كمية عددية مجردة لا اتجاه لها، فإن هذه النسبة تُعد كمية قياسية (غير متجهة)؛ وهي ميزة عملية بالغة الأهمية، إذ يمكن دمج قيمتين منها بمجرد الجمع الحسابي العادي، دون الحاجة إلى عمليات التركيب المتجهي التي يتطلبها جمع مجالين.

حقيقة أساسية:

يُعرَّف الفولت الواحد بأنه "جول واحد لكل كولوم" (1 J/C)؛ لذا فإن خليةً جهدها 1.5 فولت تمنح 1.5 جول من الطاقة لكل كولوم تدفعه عبر الدائرة الكهربية. ويُعد الفولت الواحد مقداراً صغيرا من الطاقة لكل وحدة شحنة، في حين أن صاعقة البرق تنطوي على مئات الملايين من الفولتات.

لماذا لا يمكن قياس سوى الفروق:

تتضح بقية الفكرة في سطرين: بما أن القوة الكهروستاتيكية قوة محافظة، فإن الشغل الذي تبذله أثناء انتقال الشحنة يساوي مقدار الطاقة المخزنة المفقودة خلال هذا الانتقال — أي الفرق بين قيمتي الطاقة عند نقطتي البداية والنهاية، بغض النظر عن المسار المتبع. وعند التعبير عن الطاقة المخزنة عند كل طرف بوصفها حاصل ضرب الشحنة في النسبة التي عُرِّفت للتو، نجد أن الشحنة عامل مشترك في كلا الحدين ويمكن إخراجها منهما؛ فيتبقى لدينا الشحنة مضروبة في مقدار "الهبوط" (أو الفرق) بين الطرفين (الشكل 3-3-2). وثمة نتيجة تستحق الاهتمام هنا: وهي أن "الهبوط" هو المقدار الوحيد الذي يظهر في النتيجة، دون الحاجة لذكر القيمتين المنفصلتين؛ إذ إن أي جزء مشترك بينهما يلغي بعضه بعضاً، مما يتيح لنا تحديد نقطة الصفر في أي موضع ملائم — سواء عند التأريض، أو عند أحد طرفي البطارية، أو حتى عند مسافة لا نهائية — دون أن يؤدي ذلك إلى تغيير أي تنبؤ قابل للقياس. وهذا أيضاً هو السبب في أن تحريك شحنة على طول منحنى ذِي قيمة ثابتة لا يكلّف شيئاً على الإطلاق.

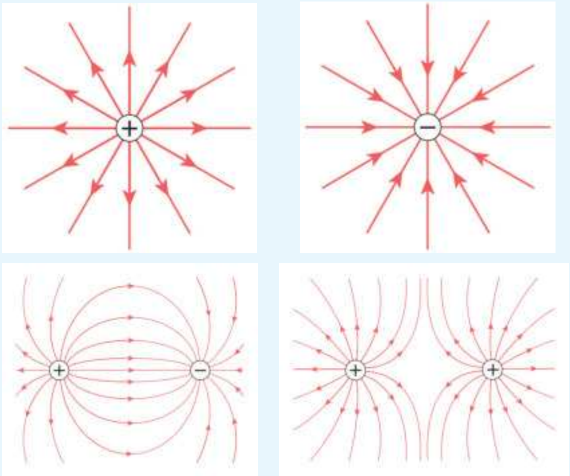

جهد أعلى
جهد أقل
الشغل المبذول بواسطة القوة الكهروستاتيكية
$W = qV_A - qV_B$
q
+
$A(V_A)$
$B(V_B)$

وصف الشكل 2–3–3: تنتقل شحنة موجبة q من A ذات الجهد VA إلى B ذات الجهد VB، فتبذل القوة الكهروستاتيكية شغلًا W = qVA – qVB عند هبوط الشحنة إلى جهد أقل.

⭐ مصطلح:

عند النقطة التي تتوقف عندها الصورة — تُعبِّر كلٌّ من المنحنيات وخطوط تساوي الجهد عند ترتيبٍ معين. فإذا تحركت الشحنات نفسها، وجب إعادة رسم النمط بأكمله؛ وعليه، فإن الصورة الثابتة والمرتبة في هذا الدرس تمثل حالة اتزان، لا خريطةً دائمةً للمجال.

نقطة



! يُطلق على الخط الذى يمثل حالة المجال الكهربائى اسم «خط المجال الكهربى». تُرسم خطوط المجال الكهربى بأسهم تشير إلى اتجاهها.

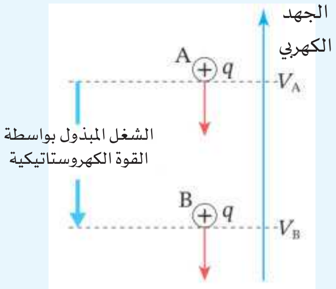
! خصائص خطوط المجال الكهربى:

- تبدأ من الشحنات الموجبة وتنتهى عند الشحنات السالبة.
- لا تتقاطع ولا تتفرع.

تكون خطوط المجال متقاربة أكثر فى المناطق التى يكون فيها المجال الكهربى أقوى.

يُحدد المماس لخط المجال عند أى نقطة اتجاه المجال الكهربى.

! تُعرف طاقة الوضع التى تمتلكها شحنة موجبة مقدارها الوحدة عند وضعها فى نقطة معينة باسم «الجهد الكهربى»، ووحدته هى الفولت (الرمز V). ويمكن التعبير عن طاقة الوضع U [بالجول] الناتجة عن القوة الكهروستاتيكية لشحنة q [بالكولوم] بالمعادلة: $U = qV$، حيث V [بالفولت] هو الجهد الكهربى.


الجهد الكهربي
A
q
V_A
B
q
V_B
الشغل المبذول بواسطة القوة الكهروستاتيكية

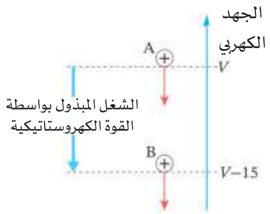
! عندما تنتقل شحنة مقدارها q [بالكولوم] من النقطة A (التى جهدها V_A) إلى النقطة B (التى جهدها V_B)، فإن الشغل الذى تبذله القوة الكهروستاتيكية يساوى مقدار النقص فى طاقة الوضع الناشئة عن هذه القوة.

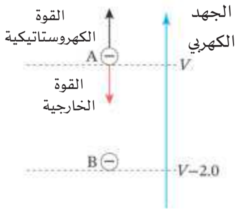
W = qVA – qVB

صندوق المعادلات:

طاقة الوضع الكهربية:	$U = qV$، حيث U بالجول وq بالكولوم وV بالفولت.
شغل القوة الكهروستاتيكية:	$W = qV_A - qV_B = q(V_A - V_B)$.

مثال محلول:





الموقف:	**عيّن ما يأتي:** (أ) وُضعت شحنة نقطية -2.0×10^{-5} C عند موضع جهده 5.0 V. عيّن طاقة وضعها U. (ب) انتقلت شحنة 4.2×10^{-8} C من A إلى B، حيث جهد B أقل من جهد A بمقدار 15 V. عيّن شغل القوة الكهروستاتيكية W. (جـ) تؤثر قوة خارجية في شحنة C 7-3.0×10- عند A وتنقلها ببطء إلى B، حيث الجهد أقل بمقدار 2.0 V. عيّن شغل القوة الكهروستاتيكية W وشغل القوة الخارجية 'W.
المعطيات والمطلوب:	(أ) $q = -2.0 \times 10^{-5}$ C و $V = 5.0$ V. (ب) $q = 4.2 \times 10^{-8}$ C و $V_A - V_B = 15$ V. (جـ) $q = -3.0 \times 10^{-7}$ C و $V_A - V_B = 2$ V.
التمثيل:	راجع شكل 3-3-2 لشحنة تتحرك من A إلى B. ويوضح شكل 2-3-4 الحالة (ج) حيث يكون جهد B أقل من A بمقدار 2.0 V، وتوازن القوة الخارجية القوة الكهروستاتيكية طوال الانتقال البطيء.
الاستراتيجية:	لحساب شغل القوة الكهروستاتيكية نحدد جهدى نقطتى البداية والنهاية ثم نستخدم $q(VA - VB)$. ولطاقة وضع شحنة ساكنة نستخدم $U = qV$.
الحل المشروح:	(أ) $U = qV = (-2.0 \times 10^{-5}) \times 5.0 = -1.0 \times 10^{-4}$ J. (ب) إذا كان جهد A هو V، فإن جهد B هو V – 15. ولذلك $W = (4.2\times10^{-8})\times V - (4.2 \times 10^{-8})\times(V - 15) =$ $(4.2\times10^{-8})\times15 = 6.3\times10^{-7}$ J (جـ) إذا كان جهد A هو V، فإن جهد B هو V – 2. ومن ثم $W = (-3.0\times10^{-7})\times V - (-3.0\times10^{-7})\times(V - 2.0) =$ $(-3.0\times10^{-7})\times2.0 = -6.0\times10^{-7}$ J ولأن الشحنة «نُقلت ببطء»، توازن القوة الخارجية القوة الكهروستاتيكية، فيكون شغل القوة الخارجية W-. ومن ثم $W' = 6.0\times10^{-7}$ J.
منطقية الحل:	(أ) للشحنة السالبة عند جهد موجب طاقة وضع سالبة. (ب) تفقد الشحنة الموجبة طاقة وضع عند انتقالها إلى جهد أقل، فتكون قيمة شغل المجال موجبة. (جـ) تعارض القوة الكهروستاتيكية النقل البطيء فتبذل شغلًا سالبًا، وتبذل القوة الخارجية شغلًا مساويًا في المقدار ومضادًا في الإشارة.
فسّرها بنفسك:	لماذا يعتمد شغل القوة الكهروستاتيكية على فرق الجهد $V_A - V_B$ فقط، ولا يعتمد على القيمة المجهولة V نفسها؟ وصف الشكل 2-3-4: مثال محلول (ج): يتم نقل شحنة سالبة ببطء من النقطة A، عند جهد V، إلى النقطة B، عند جهد V – 2.0 فولت؛ القوة الخارجية تعادل القوة الكهروستاتيكية. الآن جرّب: تنتقل شحنة نقطية مقدارها 5.0×10^{-6} C من A إلى B، حيث جهد B أقل من جهد A بمقدار 8.0 V. أوجد شغل القوة الكهروستاتيكية W.

حاول:

1- وُضعت شحنة نقطية 1.2×10^{-6} C عند موضع جهده 6.0 V. عيّن طاقة الوضع U.

2- انتقلت شحنة نقطية -3.6×10^{-8} C من A إلى B، حيث جهد B أقل من جهد A بمقدار 20 V. عيّن شغل القوة الكهروستاتيكية W.

3- أثرت قوة خارجية في شحنة نقطية 2.1×10^{-7} C عند A، ونقلتها ببطء إلى B حيث الجهد أعلى بمقدار 10 V. عيّن شغل القوة الكهروستاتيكية W وشغل القوة الخارجية W'.

في سياق جديد:

تُكتب على بطارية السيارة القيمة 12 V. وهذا الرقم فرق جهد؛ فكل كولوم تدفعه البطارية من طرفها ذي الجهد المرتفع عبر المصابيح إلى الطرف ذي الجهد المنخفض يهبط خلال فرق جهد 12 V، ويسلم المصباح 12 J من الطاقة. والعلاقة نفسها $W = q(V_A - V_B)$ التي تحكم شحنة نقطية مجهرية تحدد طاقة تيار كامل في دائرة.

دورك: تنقل بطارية 12 V شحنة مقدارها 2.0 C من الطرف مرتفع الجهد إلى الطرف منخفض الجهد. استخدم $W = q(V_A - V_B)$ لإيجاد شغل القوة الكهروستاتيكية.

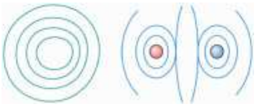
وصف الشكل: تدفع بطارية سيارة جهدها 12 V تيارًا في دائرة كاملة لإضاءة المصباح الأمامي، بينما تظل الأسلاك والبطارية مظلمة.

طبيعة العلم:

من الأصل – خطوط الكنتور على الخريطة وخطوط تساوى الجهد. تسمى الخطوط التى تصل بين نقاط متساوية الجهد الكهربائى خطوط تساوى الجهد، وهى تشبه خطوط الكنتور على الخريطة. فكما تدل خطوط الكنتور المتقاربة على منحدر شديد، تدل خطوط تساوى الجهد المتقاربة على مجال كهربائى شديد. وكما يتدفق الماء من موضع مرتفع إلى منخفض، تتحرك الشحنة الموجبة مع المجال من جهد أعلى إلى جهد أقل.

هذا تشبيه علمي؛ تُستعار صورة مألوفة، هى الارتفاع على سطح، لتسهيل التفكير فى كمية غير مرئية هى الجهد الكهربائي. والتشبيه أداة نمذجة قوية لأنه ينقل الحدس المعروف، لكنه يجب أن يُختبر عند حدوده لأن الجهد والارتفاع ليسا الكمية الفيزيائية نفسها.

دورك: اقترح خريطة أو مخططًا يوميًّا، غير خريطة الكنتور، يستخدم خطوطًا أو تظليلًا لإظهار أين تكون كمية كبيرة أو صغيرة، وبيّن ما الذى تمثله «خطوط تساوى الجهد» فيه.



وصف الشكل 2-3-5: تخضع خطوط الكنتور على تل وخطوط تساوي الجهد حول شحنتين للقاعدة نفسها؛ حيث تتقارب الخطوط يكون الميل شديدًا والمجال قويًّا

إجابة سؤال الدرس:

الخاصية التي تحدد طاقة وضع الشحنة هى الجهد الكهربائى V؛ فهو طاقة وضع وحدة الشحنة الموجبة عند النقطة. ولذلك تمتلك شحنة q طاقة $U = qV$. وعند انتقالها من A إلى B تبذل القوة الكهروستاتيكية شغلًا يساوي النقص فى هذه الطاقة: $W = q(V_A - V_B)$، وهو الدور نفسه الذى يؤديه الارتفاع فى مجال الجاذبية..

المشهد الذى بدأنا به

تمرين:

(أ) وُضعت شحنة نقطية 6.0×10^{-6} C عند موضع جهده 2.0 V. عيّن طاقة الوضع U.

(ب) وُضعت شحنة نقطية -8.0×10^{-5} C عند موضع جهده 1.5 V. عيّن طاقة الوضع U.

(جـ) انتقلت شحنة نقطية 2.1×10^{-8} C من A إلى B، حيث جهد B أقل من جهد A بمقدار 3.0 V. عيّن شغل القوة الكهروستاتيكية W.

(د) انتقلت شحنة نقطية 3.2×10^{-7} C من A إلى B، حيث جهد B أعلى من جهد A بمقدار 2.0 V. عيّن شغل القوة الكهروستاتيكية W.

(هـ) أثرت قوة خارجية في شحنة نقطية -3.2×10^{-7} C عند A، ونقلتها ببطء إلى B حيث الجهد أقل بمقدار 5.0 V. عيّن شغل القوة الكهروستاتيكية W وشغل القوة الخارجية W.

الدرس ٢-٤: المجال الكهربائي المنتظم وفرق الجهد

؟ سؤال الدرس:

في مجال كهربائي منتظم، ما العلاقة بين فرق الجهد بين نقطتين وشدة المجال والمسافة بينهما؟

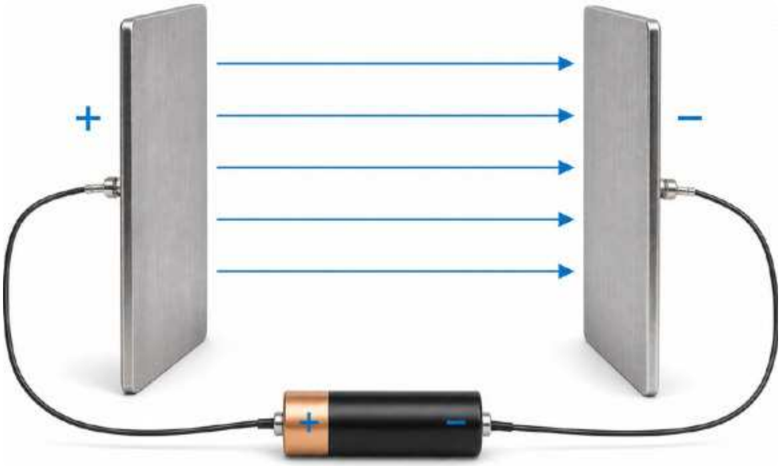
ستتعلم أن

1. تربط فرق الجهد بشدة المجال والمسافة في مجال كهربائي منتظم باستخدام **V = Ed**.
2. تنظر إلى شدة المجال **E** باعتبارها مقدار ميل منحنى الموضع-الجهد **x-V**، بوحدة **V/m**.
3. تحدد اتجاه القوة الكهروستاتيكية **F = qE** ومقدارها لشحنة موضوعة داخل المجال.

الظاهرة — تنبأ قبل أن تتابع

عند توصيل صفيحتين (لوحين) معدنيتين كبيرتين ومتوازيتين ببطارية، فإن إحداهما تكون موجبة والأخرى سالبة. يحمل الحيز بينهما مجالًا كهربائيًّا له الشدة والاتجاه نفسيهما عند كل نقطة؛ أي مجالًا منتظمًا. وإذا أُطلقت كرة صغيرة موجبة الشحنة عند أي موضع بين الصفيحتين، تعرضت لقوة ثابتة نحو الصفيحة السالبة. يكون الجهد مرتفعًا قرب الصفيحة الموجبة، وينخفض بانتظام عبر الفجوة حتى الصفيحة السالبة..

فكرة أساسية:
يكون المجال الكهربائي بين صفيحتين متوازيتين ومشحونتين منتظمًا؛ أي له الشدة والاتجاه نفسيهما عند كل نقطة.



وصف الشكل 2-4-1: المجال بين صفيحتين متوازيتين ومشحونتين منتظم، فتظل شدته واتجاهه ثابتين عند كل نقطة.

تنبأ:

(أ) عند الانتقال من الصفيحة (اللوح) الموجبة إلى السالبة، هل يرتفع الجهد أم ينخفض أم يظل ثابتًا؟

(ب) إذا ضاعفت المسافة بين الصفيحتين (اللوحين) مع ثبات فرق الجهد، فهل تزداد شدة المجال أم تقل أم تظل ثابتة..

استكشف – رسم خريطة الجهد عبر الفجوة بين صفيحتين (القطبين المتوازيين)

ما ستفعله: اقرأ الجهد عند عدة مواضع على امتداد الفجوة بين صفيحتين (قطبين) متوازيتين يثبت بينهما فرق جهد، واختبر هل تكون $E = V/x$ ثابتة في كل موضع.

الزمن: 15 دقيقة.

الأدوات:

- صفيحتان (قطبان) معدنيتان متوازيتان على حاملين.
- مصدر جهد مستمر ثابت.
- فولتميتر عالي المقاومة بمسبارين .
- مسطرة.

مسطرة

فولتميتر

مصدر تيار مستمر

ألواح متوازية

الخطوات:

١ ثبّت المسافة d بين الصفيحتين واضبط فرق جهد ثابتًا بينهما، ولا تغيره طوال المحاولة.

٢ ضع مسبارى الفولتميتر عند موضع x مقاس من الصفيحة السالبة، وسجّل الجهد V.

٣ كرر القياس عند مواضع أخرى، واحسب لكل صف $E=\frac{V}{x}$ بوحدة V/m.

٤ ارسم العلاقة بين V مقابل الموضع x، وحدد شكل المنحنى.

٥ جدول النتائج: لكل محاولة من 1 إلى 3 سجّل الموضع x بالمتر، والجهد V بالفولت، ثم $E=\frac{V}{x}$ بوحدة V/m.

رقم التجربة	الموضع x (m)	الجهد V (V)	$E=\frac{V}{x}$ (V/m)
1			
2			
3			

حلّل ما جمعته:

(أ) هل تظل $E=\frac{V}{x}$ ثابتة تقريبًا في كل موضع؟ وهل تؤدي الزيادات المتساوية في x إلى زيادات متساوية في V؟

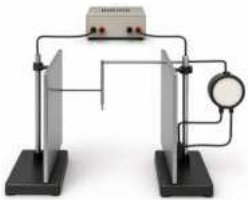
(ب) الرسم البياني للجهد V مقابل الموضع x هو خط مستقيم. ماذا يخبرك مقدار ميل الخط المستقيم عن شدة المجال الكهربائي؟ وفي أي اتجاه يشير المجال.

اكتب تفسيرك فى سطرين قبل قراءة الجزء التالى.

من الملاحظة إلى النموذج:

من أين يأتي انتظام المجال، وماذا يتيح لنا؟

لا يوجد ما يفرض على المجال الكهربائي أن يكون متساويًا في كل مكان؛ فعلى سبيل المثال، حول شحنة منفردة لا يكون المجال منتظمًا بوضوح، بل تضعف شدته مع مربع المسافة. أما (صفيحتان) لوحان كبيران ومتوازيان، فترتيبهما هو الذي يزيل هذا التغير. قف في أي مكان في


وصف الشكل 2-4-2: صفيحتان متوازيتان تفصل بينهما مسافة ثابتة d، ويحافظ مصدر تيار مستمر على فرق جهد ثابت بينهما، بينما يقرأ مسبار فولتميتر عالي المقاومة الجهد عند كل موضع x في الفجوة

ملاحظة القياس:

قِس x من الصفيحة السالبة منخفضة الجهد على الخط المستقيم المتجه إلى الصفيحة الموجبة، وأبقِ المسبار على خط المنتصف حتى تنتمي كل قراءة إلى موضع محدد

منتصف المسافة بين اللوحين، وستبدو الألواح متشابهة في كل اتجاه — فلا توجد حافة أقرب، ولا موضع مميز عن غيره — ولذلك لا يوجد شيء يجعل المجال يتغير معه.

وهذا التشابه هو الفائدة الأساسية من هذا الدرس: فهو يحوّل العلاقات التي تناولناها في الدرسين السابقين من عبارات تتعلق بالنقاط إلى عبارات تتعلق بالمسافات التي يمكنك قياسها بالمسطرة.

اشتقاق العلاقة في ثلاث خطوات:

خذ ترتيب اللوحين، وادفع شحنة q مباشرة عبر المسافة بينهما، وهي مسافة d، في اتجاه المجال الكهربائي.

الآن احسب الطاقة بطريقتين.

الطريقة الأولى: كما تعلمنا في الدرس السابق، فإن القوة الكهروستاتيكية تبذل شغلًا يساوي حاصل ضرب الشحنة q في مقدار الانخفاض بين الطرفين.

الطريقة الثانية: من الميكانيكا، إذا أثرت قوة ثابتة: $F = qE$ على امتداد مسار مستقيم طوله d، فإنها تبذل شغلًا مقداره: $W = qEd$ هاتان الطريقتان تصفان نفس انتقال الطاقة، ولذلك: $qEd =$ (الانخفاض)q وبإلغاء الشحنة q — وهو أمر منطقي، لأن اللوحين والمسافة بينهما لا يعتمدان على الشحنة التي تم نقلها — يتبقى علاقة تربط ثلاث كميات....

لماذا يكون الرسم البيانى خط مستقيم؟

الزيادات المتساوية في المسافة تقابل الآن مقادير متساوية من فرق الجهد؛ لأن المجال الكهربائي له نفس الشدة، وبالتالي يبذل الشغل نفسه خلال كل مسافة متساوية.

وأي كمية تتغير بمقادير متساوية خلال فترات متساوية يتم تمثيلها بيانيًا بخط مستقيم؛ لذلك فإن الرسم البياني Vx في صورة خط مستقيم هو دليل بصري على أن المجال الكهربائي منتظم. وعندما ينحني الرسم البياني الحقيقي، فهذا يعني أن المجال غير منتظم في تلك المنطقة. ويعبّر ميل الخط عن مقدار فرق الجهد الذي يتغير لكل متر، وهو ما يساوي شدة المجال الكهربائي بدقة. وبما أن الحركة في اتجاه المجال تعني أن الجهد الكهربائي ينخفض، فإن الخط البياني ينحدر في الاتجاه الذي يشير إليه المجال. لذلك:

* إشارة الميل تحدد اتجاه المجال.

* مقدار الميل يحدد شدة المجال الكهربائي.

فرق الجهد والعلاقة $V = Ed$:

يسمى الفرق في الجهد الكهربائي بين نقطتين $V_A - V_B$ فرق الجهد أو الفولتية. ويسمى المجال الذي له الشدة والاتجاه نفسيهما في كل نقطة مجالًا كهربائيًّا منتظمًا.

في مجال منتظم شدته E بوحدة N/C، يكون فرق الجهد V بين نقطتين A وB تفصل بينهما مسافة d مقاسة في اتجاه المجال: $V = Ed$.

شدة المجال هي ميل منحنى x–V:

من $V = Ed$ يمكن كتابة $E = V/d$. ولذلك تساوي شدة المجال E مقدار ميل الخط المستقيم في منحنى الجهد V مقابل الموضع x. ولهذا تُستخدم V/m أيضًا وحدة لشدة المجال، وهي مكافئة لـ N/C.

يتجه المجال الكهربائي من الجهد الأعلى نحو الجهد الأدنى.

مصطلح:

تفشل فكرة التشابه بالقرب من حواف اللوحين، حيث يمكن للنقطة أن تحدد أي حافة هي الأقرب إليها. هناك تنحني خطوط المجال إلى الخارج وتنتشر، ولذلك يجب أن يكون اللوحان عريضين مقارنةً بالمسافة الفاصلة بينهما قبل أن يمكن الوثوق بأي حسابات في هذا الدرس.

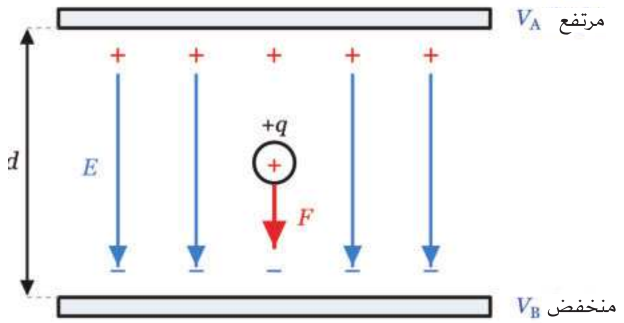
(فرق الجهد (الفولتية) هو الفرق في الجهد الكهربائي بين نقطتين VA – VB، ويقاس بالفولت.)

فكرة أساسية:

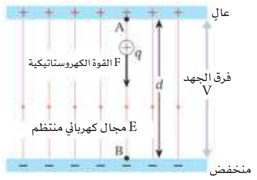
حقيقة أساسية: في المجال الكهربائي المنتظم تكون شدة المجال ثابتة عند كل نقطة، وفرق الجهد خلال مسافة d في اتجاه المجال هو $V = Ed$، ومنه $E = V/d$

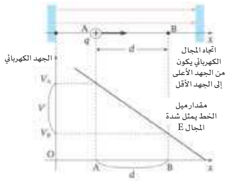
ملاحظة:

في منحنى x–V تساوي شدة المجال مقدار الميل، ويتجه المجال من الجهد الأعلى إلى الجهد الأدنى


مرتفع V_A
منخفض V_B
d
E
+q
F

وصف الشكل 2-4-3: مجال منتظم E بين صفيحتين أفقيتين تفصل بينهما مسافة d، ويتجه من الصفيحة ذات الجهد العالي V_A إلى الصفيحة ذات الجهد المنخفض V_B. وتتأثر شحنة موجبة +q بقوة $F = qE$ من الجهد العالي نحو المنخفض


عالٍ
A
q
F القوة الكهروستاتيكية
d
فرق الجهد V
E مجال كهربائي منتظم
B
منخفض


A
q
B
x
d
اتجاه المجال الكهربائي يكون من الجهد الأعلى إلى الجهد الأقل
الجهد الكهربائي
V_A
V
V_B
O
مقدار ميل الخط يمثل شدة المجال E
A
B
d
x

نقطة

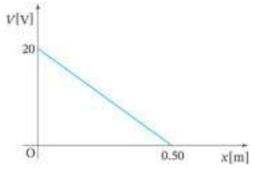
- فرق الجهد بين نقطتين هو $V_A - V_B$.
- والمجال الذي له الشدة والاتجاه نفسيهما في كل موضع هو مجال كهربائي منتظم، وفيه يكون فرق الجهد عبر مسافة d في اتجاه المجال $V = Ed$.
- ولذلك تساوي شدة المجال مقدار ميل منحنى x–V وتقاس بوحدة V/m. ويتجه المجال من الجهد الأعلى نحو الجهد الأدنى.

صندوق المعادلات:

فرق الجهد:	$V = V_A - V_B$، ووحدته الفولت.
المجال المنتظم:	$V = Ed$، ومنه $E = V/d$، ووحدة E هي $V/m = N/C$.
شغل القوة الكهروستاتيكية:	القوة على شحنة: $F = qE$؛ وتكون قوة الشحنة الموجبة في اتجاه المجال

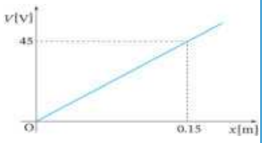
مثال محلول:

الموقف:	يوجد مجال كهربائي منتظم موازٍ لمحور x. يبين منحنى الجهد V مقابل x أن الجهد 20 V عند $x = 0$ وينخفض إلى الصفر عند $x = 0.50$ m. أ- حدد اتجاه المجال. ب- حدد شدة المجال E بوحدة V/m. ج- إذا وُضعت شحنة موجبة $+1.2\times10-7$ C في المجال، فحدد اتجاه القوة F ومقدارها.
المعطيات والمطلوب:	من المنحنى: $V = 20$ V عند $x = 0$، و$V = 0$ عند $x = 0.50$ m؛ أي إن فرق الجهد عبر $d = 0.50$ m هو 20 V. والشحنة $q = +1.2\times10-7$ C.
التمثيل:	الجهد أعلى عند $x = 0$ وأقل عند $x = 0.50$ m، والخط في منحنى x–V مستقيم.
الاستراتيجية:	نستخدم $V = Ed$، ومنه $E = V/d$ بوصفه مقدار الميل. ويشير المجال من الجهد الأعلى إلى الأدنى. ثم نستخدم $F = qE$، وتكون قوة المؤثرة على الشحنة الموجبة في اتجاه المجال.
الحل الموضح:	(أ) ينخفض الجهد عند زيادة x من 20 V إلى الصفر؛ ولذلك يتجه المجال من الجهد الأعلى إلى الأدنى، أي في الاتجاه الموجب لمحور x. (ب) $E = V/d = 20/0.50 = 40$ V/m. (ج) تتأثر الشحنة الموجبة بقوة في اتجاه المجال، أي الاتجاه الموجب لمحور x. ومقدارها $F = qE = (1.2\times10-7)\times40 = 4.8\times10-6$ N.



وصف الشكل 2-4-4: مثال محلول: ينخفض الجهد **V** بشكل منتظم من 20 فولت عند **x** = 0 إلى 0 عند **x** = 0.50 متر.

منطقية الحل:	يعطي تغير 20 V خلال 0.50 m ميلًا مقداره 40 V/m. وضرب هذه الشدة في الشحنة الصغيرة 1.2×10^{-7} C يعطي قوة من رتبة 10^{-6} N، وهو مقدار معقول. وتُدفع الشحنة الموجبة نحو الجهد المنخفض كما هو متوقع.
اشرح بنفسك:	لماذا تساوي شدة المجال مقدار ميل خط x–V؟ ولماذا تتجه قوة الشحنة الموجبة نحو الجهد المنخفض؟



وصف الشكل 2-4-5:
يرتفع الجهد V بشكل منتظم مع x ليصل الى 45 فولت عند x=1.5m

حاول:

١) تقع A وB على خط المجال نفسه في مجال منتظم. المسافة بينهما 0.80 m، وجهد A أعلى من B بمقدار 40 V. عيّن شدة المجال بوحدة V/m.

٢) يوجد مجال منتظم موازٍ لمحور x. يبين منحنى V مقابل x أن الجهد يزداد بانتظام حتى يبلغ 45 V عند $x = 0.15$ m. (أ) عيّن اتجاه المجال. (ب) عيّن شدته E. (ج) وُضعت شحنة $+1.6 \times 10^{-7}$ C داخله؛ عيّن اتجاه ومقدار القوة التي تتأثر بها الشحنة نتيجة هذا المجال.

في سياق جديد:

وصف الشكل: تعمل القاعدة المستوية لسحابة عاصفة والأرض المستوية كصفيحتين متوازيتين تقريبًا، ويؤدي انهيار عزل الهواء في المجال شبه المنتظم إلى ضربة برق نحو الأرض

يمكن أحيانًا معاملة الحيز بين القاعدة المستوية لسحابة رعدية والأرض المستوية كمجال منتظم له الشدة نفسها في كل موضع. ويمكن تقدير شدة المجال من ارتفاع السحابة وفرق الجهد بينها وبين الأرض باستخدام E = V/d. وعندما تتجاوز الشدة الحد الذي يتحمله الهواء، نحو 3×10^{6} V/m، يصبح الهواء موصلًا فجأة ويحدث البرق.

دورك: ترتفع قاعدة سحابة رعدية 800 m فوق أرض مستوية، وفرق الجهد بينهما 2.4×10^{8} V. قدّر شدة المجال، وبيّن هل وصلت إلى حد انهيار عزل الهواء 3×10^{6} V/m.

طبيعة العلم:

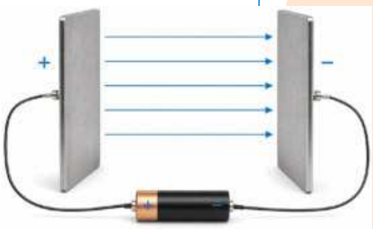
من الأصل – المجال بين سحابة رعدية والأرض. إن معاملة الفجوة الهائلة غير المنتظمة بين السحابة والأرض باعتبارها «مجالًا منتظمًا» تقريب بعيد عن الواقع؛ فالمجال الحقيقي ليس منتظمًا تمامًا. ومع ذلك يسمح النموذج البسيط بتقدير الشدة من كميتين قابلتين للقياس: فرق الجهد والمسافة، ويتنبأ بالرتبة الصحيحة لانهيار عزل الهواء.

يُحكم على النموذج الفيزيائي بمدى فائدته ووضوح حدود تنبؤه، لا بكونه مطابقًا للواقع تمامًا. ويُعتمد نموذج المجال المنتظم عندما تكون الصفائح أو الأسطح كبيرة ومتقاربة، ويفشل قرب الحواف حيث ينتشر المجال ولا تعود الخطوط مستقيمة ومتساوية التباعد.

دورك: اقترح حالة يؤدي فيها افتراض انتظام مجال كهربائي حقيقي إلى تقدير ضعيف، وحدد السمة التي تكسر افتراض الانتظام..

إجابة سؤال الدرس:

في المجال الكهربائي المنتظم ترتبط الكميات الثلاث بالعلاقة V = Ed؛ ففرق الجهد بين نقطتين يساوي شدة المجال مضروبة في المسافة بينهما مقاسة في اتجاه المجال. وبالمثل تكون E = V/d مقدار ميل منحنى x–V بوحدة V/m، ويتجه المجال من الجهد الأعلى إلى الأدنى. وتتأثر شحنة داخله بقوة F = qE، في اتجاه المجال للشحنة الموجبة.



الشكل الذى بدأناه

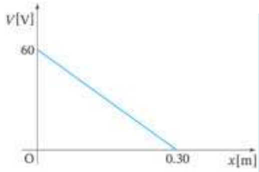
تمرين:

١) تقع A وB على خط المجال نفسه في مجال منتظم، والمسافة بينهما 0.60 m، وجهد A أعلى من B بمقدار 15 V. عيّن شدة المجال بوحدة V/m.

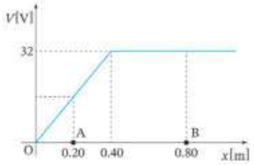
٢) تقع A وB على خط مجال منتظم شدته 40 V/m، وجهد A أعلى من B بمقدار 20 V. عيّن المسافة بينهما بالمتر.

٣) مجال منتظم موازٍ لمحور x، ويبين منحنى V مقابل x أن الجهد ينخفض من 60 V عند $x = 0$ إلى الصفر عند $x = 0.30$ m. (أ) عيّن اتجاه المجال. (ب) عيّن شدته. (ج) وُضعت شحنة $+2.8 \times 10^{-7}$ C؛ عيّن اتجاه القوة ومقدارها.

٤) يوجد مجال موازٍ لمحور x، ويزداد الجهد بانتظام حتى 32 V عند $x = 0.40$ m ثم يظل ثابتًا. تقع A عند $x = 0.20$ m وB عند $x = 0.80$ m. (أ) عيّن شدة المجال عند A. (ب) عيّن شدة المجال عند B. (ج) إذا نُقلت شحنة $+1.0 \times 10^{-7}$ C من B إلى الأصل O، فعيّن شغل القوة الكهربائية W.



وصف الشكل 2-4-6: التمرين 3: ينخفض الجهد **V** بشكل منتظم من 60 فولت عند **x** = 0 إلى 0 عند **x** = 0.30 متر



وصف الشكل 2-4-7: التمرين 4: يرتفع الجهد بشكل منتظم إلى 32 فولت عند x = 0.40 m ويبقى ثابتًا بعد ذلك؛ تقع النقطة A عند x = 0.20 m وتقع النقطة B عند x = 0.80 m

الدرس ٢ ـ ٥: حركة الشحنات تحت تأثير قوة كهروستاتيكية

؟ سؤال الدرس:

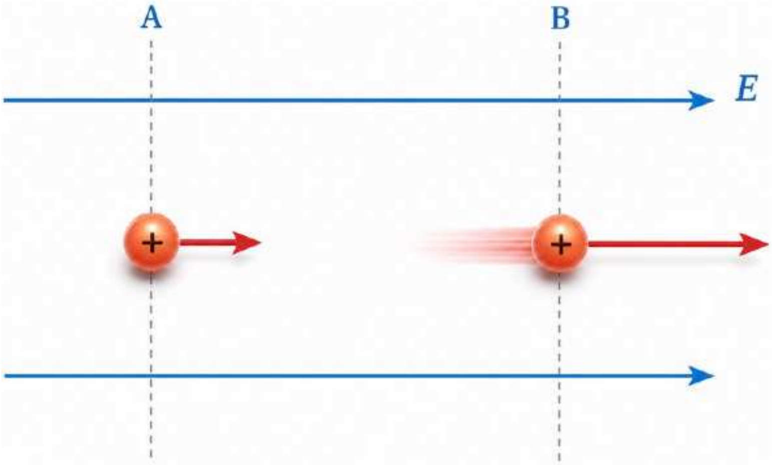
مثلما تزداد سرعة كرة ساقطة بفعل الجاذبية، كيف تتغير سرعة الشحنة وطاقتها أثناء حركتها في مجال كهربائي؟

ستتعلم أن

1. تعبّر عن طاقة وضع شحنة في مجال كهربائي بالعلاقة $U = qV$ بوحدة الجول.
2. تطبق حفظ الطاقة الميكانيكية، $\frac{1}{2}mv^2 + qV =$ ثابت، على شحنة تتأثر فقط بالقوة الكهروستاتيكية وحدها.
3. تجد سرعة جسيم مشحون عند نقطة من سرعته وجهده عند نقطتين معلومتين، مع مراعاة إشارات q وV.

الظاهرة — تنبأ قبل أن تستمر

يوجد أيون موجب في منطقة ذات جهد كهربائي مرتفع، ثم يتحرك نحو منطقة جهدها أقل تحت تأثير القوة الكهروستاتيكية وحدها. دون أن يدفعه أحد تزداد سرعته، مثل كرة تسقط من ارتفاع بفعل الجاذبية. هنا يبذل المجال الكهربائي الشغل، فتتحول طاقة الوضع الكهربائية المختزنة إلى طاقة حركة...



وصف الشكل 2-5-1: تزداد سرعة أيون موجب أثناء انتقاله من A ذات الجهد المرتفع إلى B ذات الجهد الأقل في اتجاه المجال E

فكرة أساسية:
القوة الكهروستاتيكية قوة محافظة؛ فالشغل الذي تبذله بين نقطتين لا يعتمد على المسار المتبع. حيث عندما تتحرك شحنة موجبة من جهد كهربائي أعلى إلى جهد كهربائي أقل، فإن طاقة وضعها الكهربائية تقل، وتتحول هذه الطاقة إلى طاقة حركة، فتزداد سرعته

تنبأ:

(أ) أثناء انتقال الأيون الموجب من جهد مرتفع إلى جهد أقل، هل تزداد طاقة حركته، أم تنقص، أم تظل ثابتة؟

(ب) عندما تنخفض طاقة وضعه qV، فأين تذهب هذه الطاقة؟

استكشف - تبادل الطاقة على مستوى مائل أملس

ما ستفعله: دحرج كرة صغيرة على مستوى مائل أملس، وقِس السرعة التي تكتسبها نتيجة انخفاض رأسي معلوم، لتختبر هل تحدد قيمة الانخفاض وحدها مقدار السرعة المكتسبة.

الزمن: 15 دقيقة.

الأدوات:

- مستوى أو مسار مائل أملس منخفض الاحتكاك.
- بوابة ضوئية بمؤقت لقراءة السرعة عند B.
- ميزان لتعيين كتلة الكرة m.
- كرة زجاجية أو فولاذية صغيرة.
- مسطرة أو عصا مترية.

ميزان

مسطرة

بوابة ضوئية

منحدر مائل

الخطوات:

١ زن الكرة لتعيين كتلتها m، وضع البوابة الضوئية عند نقطة منخفضة B على المستوى الأملس.

٢ حرر الكرة من السكون عند نقطة محددة A، وقِس الانخفاض الرأسي Δh إلى B، واقرأ سرعتها vB من البوابة.

٣ احسب لكل محاولة طاقة الحركة المكتسبة $\frac{1}{2}mv_B^2$، وطاقة وضع الجاذبية المفقودة $mg\Delta h$، مع $g = 9.8\ m/s^2$.

٤ كرر من نقطتي إطلاق أعلى بحيث تزداد Δh في كل مرة.

محاولة	Δh بالمتر	V_B بوحدة (m/s)	V_B^2 بوحدة (m^2/s^2)	$V^2/\Delta h$ بوحدة (m/s^2)
1				
2				
3				

حلِّل ما جمعته:

(أ) هل تظل $vB^2/\Delta h$ ثابتة ضمن خطأ القياس عند زيادة ارتفاع الإطلاق؟ وماذا تخبرك القيمة الثابتة عن مصير الطاقة التي تفقدها الكرة عند الهبوط؟

(ب) القوة الكهروستاتيكية محافظة مثل الجاذبية. فإذا استبدلت mgh بطاقة الوضع الكهربائية qV، فما هو المجموع الثابت الذي يجب أن تحافظ عليه الشحنة؟ وهل تزداد سرعتها أم تقل عندما تنخفض qV؟

اكتب تفسيرك فى سطرين قبل قراءة الجزء التالى.

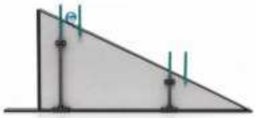
من الملاحظة إلى النموذج:

طاقة الوضع لشحنة في مجال:

لماذا يجب أن تكون الطاقة مساوية للشحنة مضروبة في الجهد؟

لأن هذا هو المعنى المقصود بالجهد أصلًا؛ فكل كولوم يوضع عند نقطة معينة يمتلك مقدارًا محددًا من الطاقة، والجهد الكهربائي V ليس إلا مقدار هذه الطاقة لكل كولوم.

نضرب الجهد في عدد الكولومات الموجودة فعليًا عند تلك النقطة، فنحصل على الطاقة نفسها بوحدة الجول.


وصف الشكل 2-5-2: تُحرر كرة عند A على ارتفاع hA، فتنزلق على مستوى أملس منخفض الاحتكاك إلى B ذات الارتفاع hB، وتقرأ بوابة ضوئية سرعتها.

ملاحظة القياس:
حرر الكرة من السكون، وخذ $\Delta h = h_A - h_B$ باعتباره الهبوط الرأسي لا طول المسار المائل. تحمل الكرة المتدحرجة جزءًا من طاقتها في صورة دوران، ولذلك تكون $\frac{1}{2}mv^2$ المقاسة أقل من $mg\Delta h$ بالنسبة نفسها تقريبًا في كل محاولة؛ والثابت الدقيق هو التناسب: إذا تضاعف الهبوط تضاعفت v^2.

لا يوجد شيء إضافي تم قياسه هنا؛ فخريطة الجهد للمجال، التي تم رسمها مرة واحدة، تتحول إلى خريطة للطاقة بمجرد تحديد مقدار الشحنة التي نضعها عليها.

وبما أن الشحنة يمكن أن تكون موجبة أو سالبة، كما أن الجهد يمكن أن تكون قيمته أقل من الصفر، فإن حاصل الضرب يحمل إشارتين مستقلتين؛ فمثلًا:

الشحنة السالبة الموضوعة عند جهد موجب تمتلك طاقة وضع سالب.

لماذا يمكن كتابة سجلّ للطاقة أصلًا؟

تُعطى الجاذبية طاقةَ وضع mgh لسبب واحد: الشغل الذي تبذله الجاذبية بين ارتفاعين معينين يكون نفسه، بغضّ النظر عن المسار الذي يسلكه الجسم.

وبالمثل، فإن القوة الكهروستاتيكية ترتبط بطاقة الوضع qV للسبب نفسه. وهذه الخاصية هي التي تجعل الحساب بأكمله ممكنًا؛ إذ إن الشغل الذي يبذله المجال بين نقطتين يتحدد فقط بجهدي النقطتين، ولذلك لا يمكن أن يُستهلك جزء من الطاقة في طول المسار أو شكله.

ومن ثم، فإن أي نقص في طاقة الوضع يجب أن يظهر في صورة زيادة في طاقة الحركة، ولا شيء آخر. نحسب مجموع الطاقتين عند البداية، ثم عند النهاية، ونجعل القيمتين متساويتين، ونختصر الكتلة والشحنة حيث تتكرران، فنحصل على معادلة السرعة المجهولة.

$$V_B{}^2 = V_A{}^2 + \frac{2q(V_A - V_B)}{m}$$

لاحظ ما الذي لا يظهر في المعادلة:

لا توجد مسافة، ولا شدة مجال كهربائي، ولا وصف للمسار.

فقط الجهدان عند النقطتين والسرعة التي بدأ بها الجسم.

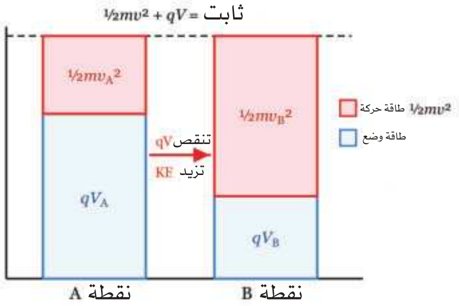
تكتب طاقة الوضع U الناتجة عن القوة الكهروستاتيكية لشحنة q في الصورة U = qV، حيث V هو الجهد عند موضع الشحنة. ويحمل كل من q وV إشارته، ولذلك قد تكون U موجبة أو سالبة.

حفظ الطاقة الميكانيكية

لأن القوة الكهروستاتيكية قوة محافظة، ينطبق عليها قانون حفظ الطاقة الميكانيكية: طاقة الوضع + طاقة الحركة = ثابت.

إذا مرت شحنة كتلتها m بالنقطة A بسرعة vA وجهد VA، ثم بالنقطة B بسرعة vB وجهد VB، ظل مجموع qV و$\frac{1}{2}mv^2$ ثابتًا$\frac{1}{2}mv_A^2 + qV_A = \frac{1}{2}mv_B^2 + qV_B$:

عندما تنخفض طاقة الوضع ترتفع طاقة الحركة بالمقدار نفسه وتزداد سرعة الشحنة.



وصف الشكل 3 ـ 5 ـ 2: يوضح مخطط الطاقة عند A وB أن طاقة الوضع qV وطاقة الحركة $\frac{1}{2}mv^2$ تتبادلان، لكن مجموعهما يظل ثابتًا؛ فعندما تنخفض qV من A إلى B ترتفع طاقة الحركة بالمقدار نفسه

حقيقة أساسية:

الجول، كما يُقرأ من خريطة الجهد الكهربى
1J = 1C V
أي أن شحنة مقدارها واحد ميكروكولوم عند جهد مقداره واحد كيلوفولت تمتلك بالفعل طاقة مقدارها ميلي جول واحد.
أما الأيون الذي يحمل شحنة مقدارها 10^{-19}، فيحتاج إلى آلاف الفولتات حتى تصبح الطاقة التي يخزنها ذات قيمة يمكن حسابها وقياسها

مصطلح:

القوة المحافظة قوة هي قوة يكون شغلها بين نقطتين متماثلًا على طول أي مسار، وهذا هو بالضبط الشرط اللازم لوجود طاقة وضع لهذه القوة.
أما الاحتكاك ومقاومة الهواء فلا يحققان هذا الشرط؛ إذ يزداد شغلهما بزيادة طول المسار، ولذلك لا يمكن تعريف طاقة وضع ثابتة لهما.
وبالتالي، فإن مجموع الطاقة الميكانيكية لا يظل ثابتًا بمجرد تأثير إحدى هاتين القوتين على الشحنة.
لذلك يفترض نموذج هذا الدرس أن الشحنة تتأثر بالمجال الكهربائي وحده ويعتمد شغلها على نقطتي البداية والنهاية فقط، ولذلك ترتبط بطاقة وضع.
والقوة الكهروستاتيكية محافظة، ويكون لها $\frac{1}{2}mv^2 + qV =$ ثابت.

ملاحظة:

يظل مجموع طاقة الحركة وطاقة الوضع الكهربائية ثابتًا عند كل نقطة:

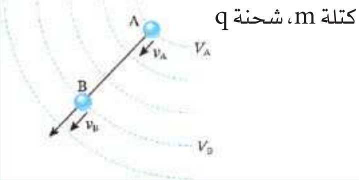
$\frac{1}{2}mv_A^2 + qV_A = \frac{1}{2}mv_B^2 + qV_B$

نقطة:

! قانون حفظ الطاقة الميكانيكية: - ثابت = طاقة الحركة + طاقة الوضع

! يمكن التعبير عن طاقة الوضع U[J] الناتجة عن القوة الكهروستاتيكية التي تمتلكها شحنة q[C] بالعلاقة: U=qV حيث **V [V]** هو الجهد الكهربائي.

! بما أن القوة الكهروستاتيكية قوة محافظة، فإن قانون فظ الطاقة الميكانيكية ينطبق عند النقطتين A و B:


كتلة m، شحنة q

	طاقة الحركة	طاقة الوضع بسبب القوة الكهروستاتيكية
1	$\frac{1}{2}mv_A^2$	qV_A
2	$\frac{1}{2}mv_B^2$	qV_B

$$\frac{1}{2}mv_A^2 + qV_A = \frac{1}{2}mv_B^2 + qV_B$$

يجب أن تكون لكل من q و V إشارة.

صندوق المعادلات:

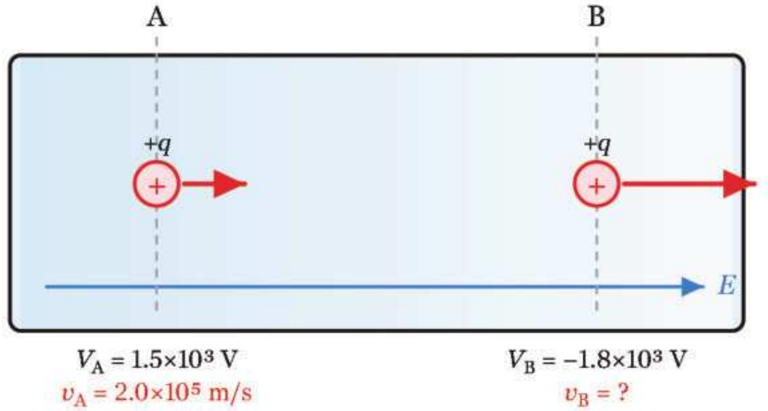
طاقة الوضع الكهروستاتيكية:	$U = qV$
الوحدة:	الجول J، حيث q بالكولوم C، و V بالفولت V. سجلّ الطاقة (Energy ledger) مجموع الحدّين المكتوب في النقطة السابقة يأخذ قيمة واحدة ثابتة طوال الرحلة. نحسبه عند نقطة البداية، ثم نحسبه عند نقطة النهاية، ونجعل القيمتين متساويتين.
سرعة الجسيم عند النقطة B:	$V_B^2 = V_A^2 + \frac{2q(V_A - V_B)}{m}$ (بعد حل سجلّ الطاقة لإيجاد السرعة المجهولة)

مثال محلول:

الموقف:	مرأيون موجب كتلته 6.6×10^{-27} kg وشحنته 3.2×10^{-19} C بالنقطة A، جهدها 1.5×10^3 V، بسرعة 2.0×10^5 m/s. عيّن سرعته عند B، جهدها -1.8×10^3 V، بافتراض أن القوة الكهروستاتيكية وحدها تؤثر فيه.
المعطيات والمطلوب:	$m = 6.6 \times 10^{-27}$ kg، و $q = 3.2 \times 10^{-19}$ C، و $V_A = 1.5 \times 10^3$ V، و $V_A = 2.0 \times 10^5$ m/s، و $V_B = -1.8 \times 10^3$ V. المطلوب V_B.
التمثيل:	يحمل الأيون عند كل نقطة طاقة حركة $\frac{1}{2}mv^2$ وطاقة وضع qV، ويظل مجموعهما متساويًا عند A و B.
الاستراتيجية:	حدِّد النقطتين اللتين يمر بهما الأيون، واكتب الكميات المعروفة عند كل نقطة: السرعة والجهد الكهربائي. وبما أن شغل المجال يتحدد بواسطة هذين الجهدين فقط، فيمكن حساب مجموع الطاقتين عند نقطة البداية، ثم حسابه مرة أخرى عند نقطة النهاية، وبعد ذلك نجعل القيمتين متساويتين. عوِّض عن q وعن الجهدين مع مراعاة إشاراتهما؛ فالجهد الثاني هنا سالب، ثم أوجد المجهول المتبقي نساوي مجموع طاقة الحركة وطاقة الوضع عند البداية والنهاية، لأن القوة الكهروستاتيكية محافظة. نحتفظ بإشارات q و V.

ملاحظة مهمة:
لا تحدد مسبقًا الاتجاه الذي يجب أن تزداد فيه سرعة الجسيم. فالشحنة السالبة تعكس الحالة؛ إذ يمكنها أن تزداد سرعتها أثناء تحركها نحو جهد كهربائي أعلى، لأن q<0، وبالتالي فإن حاصل الضرب qV يقل عندما يزداد V.
لذلك، عوِّض بالقيم التي تحمل إشاراتها الصحيحة، ودع العمليات الجبرية تحدد النتيجة

الحل الموضح:	من حفظ الطاقة: $½mvA^2 + qV_A = ½mvB^2 + qV_B$. $½ × (6.6×10× ½ = (10^3×1.5) × (^{19−}10×3.2) + ^2(10^5×2.0) × (^{27−}$ $^{27−}10×6.6))× v^2 + (3.2×10^{−19}) × (− 1.8×10^3)$. إذن $v^2 = (2.0×10^5)^2 + [2 ×(3.2×10^{−19})×\{ 1.5×10^3 − (− 1.8×10^3)\}] ÷(6.6×10^{−27})$. $v^2 = 4.0 × 10^{10} + 32 × 10^{10} = 36 × 10^{10}$ ومنه $v = 6.0 × 10^5$ m/s.
منطقية الحل:	انخفض الجهد بمقدار $3.3 × 10^3$ V، ولذلك يفقد الأيون الموجب طاقة وضع كهربائية وتزداد سرعته. والسرعة النهائية $6.0 × 10^5$ m/s أكبر من الابتدائية $2.0 × 10^5$ m/s كما هو متوقع.
اشرح بنفسك:	لماذا تزداد سرعة الأيون رغم أن جهد B سالب؟ ولماذا يجب الاحتفاظ بإشارة V_B؟



وصف الشكل 4-5-2: يمر الأيون الموجب A بسهم سرعة قصير ($V_A = 2.0×10^3$ m/s، $V_A = 1.5 × 10^3$ V) و B بسهم أطول ($V_B = −1.8 × 10^3$ V، $V_B = ?$).

الآن حاول: أيون موجب كتلته $6.6 × 10^{−27}$ kg وشحنته $3.2 × 10^{−19}$ C أُطلق من السكون عند A ذات الجهد $1.65 × 10^3$ V، وانتقل إلى B ذات الجهد صفر تحت تأثير القوة الكهروستاتيكية وحدها. أوجد سرعته عند B.

حاول:

١) وُضع جسيم مشحون كتلته $3.0 × 10^{−6}$ kg وشحنته $1.6 × 10^{−7}$ C برفق عند A ذات الجهد 8.0 V، فبدأ يتحرك. عيّن سرعته عند B ذات الجهد 2.0 V، بافتراض أن القوة الكهروستاتيكية وحدها تؤثر فيه..

في سياق جديد:

مدفع الإلكترونات الموجود في أنبوب مفرغ يستخدم مبدأ تبادل الطاقة نفسه بصورة معكوسة. يُطلق إلكترون سالب الشحنة من السكون قرب فتيلة ساخنة، ويُجذب نحو صفيحة عند جهد أعلى. وأثناء عبوره فرق الجهد تنخفض طاقة وضعه الكهربائية وتزداد طاقة حركته، فيصل إلى الصفيحة بسرعة كبيرة؛ وهذا أساس شعاع الإلكترونات في شاشات التلفاز القديمة.

دورك: يبدأ إلكترون، مقدار شحنته $1.6 × 10^{−19}$ C وكتلته $9.1 × 10^{−31}$ kg، من السكون ويتسارع خلال فرق جهد 100 V . استخدم $½mv^2 = |q|V$ لتقدير سرعته النهائية.

وصف الشكل: داخل أنبوب مفرغ تخرج الجسيمات من الفتيلة الساخنة بسرعة تكاد تكون صفرًا، وتتسارع خلال فتحة المصعد لتكوّن حزمة سريعة مستقيمة نحو الشاشة.

طبيعة العلم:

١) من الأصل – آلية مسرّع الجسيمات. تستخدم بحوث الفيزياء أجهزة ضخمة تسمى المسرعات لتسريع الإلكترونات والبروتونات إلى سرعات قريبة من سرعة الضوء ثم تصادمها. حيث يُنشأ بداخلها مجال كهربائي قوي لجذب الجسيمات المشحونة، وبتحويل طاقة الوضع الكهربائية المكتسبة من المجال الكهربائي القوي إلى طاقة حركة، تصل الجسيمات إلى سرعات هائلة.

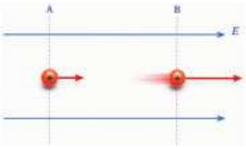
وصف الشكل 2-5-5: مسرّع خطي يمر فيه جسيم مشحون عبر سلسلة من أنابيب الانجراف، ويمنحه المجال في كل فجوة دفعة تحول طاقة الوضع الكهربائية إلى حركة فتستمر سرعته في الزيادة.

٢) العلاقة $\frac{1}{2}mv^2 + qV =$ ثابت، التي تُختبر على أيون بطيء في المختبر، هي مبدأ حساب الطاقة نفسه الذي يوجه آلات تمتد لكيلومترات. لكن عند الاقتراب من سرعة الضوء يجب استبدال طاقة الحركة بصيغتها النسبية. وهكذا تكتسب النماذج الثقة: يتم التأكد من صحة القانون في حالة بسيطة مضبوطة، ثم يواصل التنبؤ خارجها. ونفس الحساب الذي يفسر كرة على مستوى مائل، يفسر أيونًا بين صفيحتين، وبروتونًا في مسرّع.

دورك: اقترح جهازًا يوميًّا يسرع الشحنات بتحويل طاقة الوضع الكهربائية إلى طاقة حركة، واذكر الطاقتين المتبادلتين.

إجابة سؤال الدرس:

لأن القوة الكهروستاتيكية محافظة، تحفظ الشحنة المتحركة في مجال كهربائي طاقتها الميكانيكية: $\frac{1}{2}mv^2 + qV =$ ثابت. وعندما تنتقل إلى جهد تصبح عنده طاقة وضعها qV أقل، تتحول الطاقة المفقودة إلى طاقة حركة فتزداد سرعتها، مثل كرة ساقطة تحول طاقة وضع الجاذبية إلى حركة. ويتبع تغير السرعة $V_B{}^2 = vA^2 + 2q(V_A - V_B)/m$ مع مراعاة إشارات q وV.



المشهد الذي بدأنا به

تمرين:

١). مر أيون موجب كتلته 6.6×10^{-27} kg وشحنته 3.2×10^{-19} C بالنقطة A، جهدها 3.3×10^3 V، بسرعة 2.0×10^5 m/s. عيّن سرعته عند B ذات الجهد صفر، بافتراض أن القوة الكهروستاتيكية وحدها تؤثر فيه.

٢. كانت شحنة موجبة مقدارها q وكتلتها m ساكنة عند A ذات الجهد V_A، ثم أثرت فيها القوة الكهروستاتيكية وحدها فمرت بالنقطة B ذات الجهد V_B، حيث $V_A > V_B$. عيّن سرعتها عند B.

الدرس ٢-٦ — المكثف

؟ سؤال الدرس:

ما الآلية التي تستطيع تخزين الكهرباء مؤقتًا ثم إطلاقها في صورة تيار عند الحاجة؟

ستتعلم

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. ربط الشحنة المختزنة بفرق الجهد بين طرفي المكثف بالعلاقة $Q = CV$، وتقيس السعة C بالفاراد F.

٢. تحول قيم السعة بين الفاراد والميكروفاراد μF والبيكوفاراد pF.

٣. تتنبأ بأثر تنصيف المسافة بين اللوحين أو مضاعفتها في الشحنة والجهد، بحسب بقاء البطارية متصلة أو فصلها.

حقيقة أساسية: السعة C هي مقدار الشحنة التي يخزنها المكثف لكل فولت؛ $Q = CV$، وتقاس بالفاراد، حيث $1\ F = 1\ C/V$.

الظاهرة — تنبأ قبل أن تستمر

يبقى جهاز مزيل الرجفان صامتًا حتى تدعو الحاجة إليه. بضغطة زر، تشحن بطاريةٌ ببطء مكثفًا داخليًا حتى يصل إلى جهد عالٍ، مخزنةً شحنة كبيرة $Q = CV$ على ألواحه. عند تشغيل المجاديف، تتدفق تلك الشحنة المخزنة دفعة واحدة – نبضة تيار قوية واحدة تُطلق في جزء من الثانية. حيث يخزن الجهاز الكهرباء بهدوء، ثم يطلقها كلها عند الحاجة.

+ + + + +
- - - - -
النتيجة المخزنة Q = CV
CHARGED

وصف الشكل (2.6.1): يشحن جهاز إزالة الرجفان القلبي مكثفًا إلى جهد مرتفع فيختزن $Q = CV$، ثم يطلق الشحنة في نبضة تيار قصيرة وقوية.

توقّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) أثناء شحن المكثف، هل يكون تيار الشحن أكبر عند اللحظة الأولى أم عندما يقترب المكثف من الامتلاء؟

(ب) بعد شحن المكثف وفصل البطارية، هل تبقى الشحنة عليه أم تتسرب فورًا؟

استكشف — ارسم عملية العبور

ما ستفعله: اشحن المكثف نفسه عند جهود مختلفة، ثم أفرغ كل شحنة خلال مصباح، ولاحظ كيف تتبع الشحنة المختزنة جهد الشحن.

الزمن: 15 دقيقة

ما تحتاجه (الأدوات):

- مكثف
- بطارية قابلة لضبط الجهد
- مفتاح ثنائي الاتجاه
- مصباح صغير
- مقياس كولوم لقراءة Q.

مصباح

مفتاح ذو اتجاهين

بطارية

مكثف

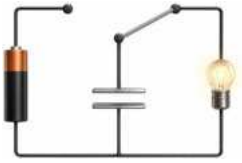
الخطوات:

١ اضبط المفتاح ناحية البطارية واشحن المكثف إلى جهد مختار V، ثم اقرأ فرق الجهد بين اللوحين.

٢ حوّل المفتاح ناحية المصباح؛ يفرغ المكثف شحنته فيومض المصباح. اقرأ Q على مقياس الكولوم، ولاحظ أن الوميض الأكثر سطوعًا والأطول زمنًا يقابل شحنة أكبر.

٣ كرر عند جهود شحن أعلى، واحسب لكل محاولة النسبة Q/V.

٤ للتحقق، استبدل المكثف بآخر أكبر سعة واشحنه إلى الجهد نفسه.



وصف الشكل (2.6.2): يوصل مفتاح ثنائي الاتجاه المكثف بالبطارية للشحن أو بالمصباح للتفريغ.

ملاحظة القياس: انتظر استقرار جهد الشحن قبل تحويل المفتاح، واستخدم المصباح نفسه في جميع المحاولات، واعتمد اتجاه قيم Q/V أكثر من الاعتماد على ومضة واحدة.

المحاولة	جهد الشحن V بالفولت	الشحنة Q بالميكروكولوم	Q/V بالميكروفاراد
١			
٢			
٣			

حلّل ما جمعته:

(أ) ماذا يحدث للشحنة Q عند زيادة V؟ وماذا تلاحظ في النسبة Q/V؟

(ب) تمثل القيمة الثابتة لـQ/V السعة C. استخدمها للتنبؤ بالشحنة عند جهد لم تختبره، وفسر لماذا أعطى المكثف الأكبر ومضة أكبر عند الجهد نفسه.

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

لماذا تزداد الشحنة المخزنة تدريجيًا مع الجهد؟

انظر إلى ما تفعله البطارية فعليًا. فهي تسحب الإلكترونات من إحدى اللوحتين وتجمعها على اللوحة الأخرى، وكل إلكترون تنقله يجعل نقل الإلكترون التالي أكثر صعوبة؛ إذ إن اللوحة التي فُرِّغت من الإلكترونات تجذبها مرة أخرى، بينما اللوحة التي تراكمت عليها الإلكترونات تدفعها للخلف. لذلك لا تستمر عملية انتقال الشحنة إلى ما لا نهاية، بل تتوقف عندما تُكوِّن اللوحتان فرق جهد يساوي فرق جهد البطارية.

إذا بذلت البطارية دفعًا أكبر بمرتين، فإن التوقف يحدث عند ضعف الزمن تقريبًا، مع انتقال ضعف كمية الشحنة.

ومن هنا تأتي العلاقة الخطية المباشرة المذكورة في النقطة (Point)؛ فهي ليست مجرد قانون طبيعي اكتُشف بالتجربة، بل يمكن فهمها من خلال حسابات عملية شدّ وجذب تنتهي دائمًا بالتوازن.

وثابت التناسب يجيب عن سؤال واحد:

ما مقدار الشحنة التي يمكن لهذا الزوج من اللوحات أن يخزنها قبل أن يقاوم بزيادة مقدارها فولت واحد؟

ما الذي يحدده الشكل الهندسي؟

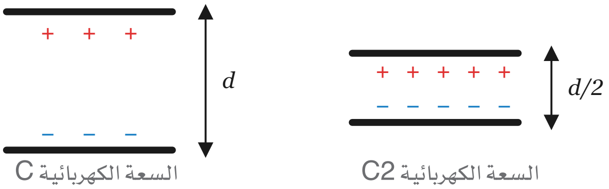
هناك عاملان هندسيان يتحكمان في هذه الكمية، وكلاهما يعمل وفق سلسلة الاستدلال نفسها.

فعندما تزداد المسافة بين اللوحتين، تنتشر الشحنة نفسها على نطاق أكبر، فتكون كثافتها أقل، وبالتالي يكون تأثيرها في مقاومة انتقال المزيد من الشحنة أضعف. لذلك يتأخر الوصول إلى حالة التوقف، ويمكن تخزين كمية أكبر من الشحنة قبل أن يصل فرق الجهد إلى القيمة المطلوبة أي أن السعة تزداد بزيادة مساحة اللوحين.

أما إذا قلّلنا المسافة بين اللوحين، فإن كثافة الشحنة على اللوحين لا تتغير، لكن الشحنة أصبحت تحتاج إلى الانتقال عبر مسافة أقصر. لذلك يتولد فرق جهد أصغر من كمية الشحنة نفسها، ويمكن تخزين شحنة أكبر قبل أن يتساوى فرق الجهد مع جهد البطارية — أي أن السعة تزداد كلما قلت المسافة بين اللوحين.

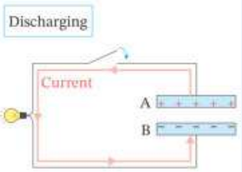
إذا نصّفنا المسافة بين اللوحين، فإن السعة تتضاعف، وهذا بالضبط هو التغيير الذي يوضحه المثال المحلول التالي.

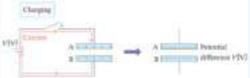
نفس مساحة اللوحين، ونفس فرق الجهد V:

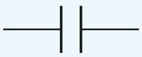


وصف الشكل (3.6.2): عند ثبات مساحة اللوحين والجهد، يؤدي تنصيف المسافة إلى مضاعفة السعة، فيخزن اللوحان المتقاربان ضعف الشحنة.

نقطة







وصف الشكل (4.6.2): رمز المكثف في الدائرة لوحان متوازيان.

عندما يتقابل لوحان معدنيان متساويا المساحة ويتصلان بطرفي بطارية، تتحرك الشحنة في صورة تيار وتُختزن على اللوحين. يسمى الجهاز مكثفًا، ويسمى اللوحان قطبيه أو لوحيه. ويسمى تخزين الشحنة شحنًا، ويسمى خروجها مرة أخرى في صورة تيار تفريغًا.

! تتناسب الشحنة Q المختزنة مع فرق الجهد V بين اللوحين: $Q = CV$. وثابت التناسب C هو السعة الكهربائية، ووحدته الفاراد F.

الوحدات العملية والعوامل المحددة للسعة

لأن السعات الواقعية صغيرة عادة، يكتب $1\ \mu F$ في صورة $10^{-6}\ F$، و$10^{-12}\ F$ في صورة $1\ pF$.

فمثلًا $30\ \mu F = 30 \times 10^{-6}\ F$، و $45\ pF = 45 \times 10^{-12}\ F$.

تنبيه:

يحمل لوحا المكثف +Q و−Q، ولذلك يظل المكثف متعادلًا كليًا. وتمثل Q الشحنة المنقولة من لوح إلى الآخر، لا شحنة خُلقت.

مصطلح:

المكثف: زوج من الأقطاب الكهربائية المتقابلة (الألواح) التي تخزن الشحنة؛ الشحن يخزنها، والتفريغ يطلقها كتيار كهربائي.

السعة الكهربائية (Capacitance) هي خاصية للمكوّن أو الجهاز نفسه (Hardware)، وليست خاصية للشحنة الموجودة عليه.

حتى إذا كان الجهاز فارغًا تمامًا من الشحنة، تظل السعة C كما هي دون تغيير؛ لأن قيمة السعة تتحدد بواسطة:

* شكل اللوحين.
* المسافة بين اللوحين.
* المادة التي تملأ الفراغ بينهما.

وهنا أيضًا يصل النموذج النظري إلى حدوده: فعندما تتراكم شحنة كبيرة بدرجة كافية، يحدث انهيار للعازل الموجود بين اللوحين. عندها يقوم المكثف بتفريغ شحنته فجأة، ولا يعود من الممكن وصف سلوكه باستخدام قيمة ثابتة للسعة C.

حقيقة أساسية:

يتم تعريف الفاراد من خلال 1 كولوم لكل فولت: F = 1 C/V. شحنة مقدارها 1 كولوم على مكثف سعته 1 فاراد تكون عند 1 فولت.

ولهذا السبب نادرًا ما تُستخدم وحدة الفاراد بصورتها الأساسية؛ لأن الكولوم كمية هائلة جدًا من الشحنة بالنسبة لما يمكن أن تخزنه ألواح المكثف، بينما تكون قيم المكثفات العادية أصغر بملايين أو تريليونات المرات.

لذلك فإن البادئات المستخدمة (Prefixes) مع وحدة الفاراد ليست مجرد وسيلة لتسهيل كتابة الأرقام، بل هي ضرورة

نظرًا لأن السعة الواقعية عادةً ما تكون صغيرة جدًا، يُكتب 10^{-6} فاراد على شكل ميكروفاراد (μF) و10^{-12} فاراد على شكل بيكوفاراد (pF)؛ على سبيل المثال، 30 ميكروفاراد = 30×10^{-6} فاراد و45 بيكوفاراد = 45×10^{-12} فاراد. تتناسب السعة طرديًا مع مساحة الألواح وعكسيًا مع المسافة بينها، لذا فإن تقريب الألواح أو توسيعها يزيد من السعة. وبالتالي، فإن تقليل المسافة إلى النصف يضاعف السعة.

تتناسب السعة طرديًّا مع مساحة اللوحين وعكسيًّا مع المسافة بينهما؛ لذلك يؤدي تقريب اللوحين أو زيادة مساحتهما إلى زيادة C، وتنصيف المسافة يضاعف السعة.

الشحنة المختزنة في مكثف $Q = CV$، حيث C السعة بالفاراد $1\ \text{pF} = 10^{-12}\ \text{F}$ و$1\ \mu\text{F} = 10^{-6}\ \text{F}$ تتناسب السعة طرديًّا مع مساحة اللوحين وعكسيًّا مع المسافة بينهما. عند فصل البطارية تثبت الشحنة، وعند بقائها متصلة يثبت الجهد.

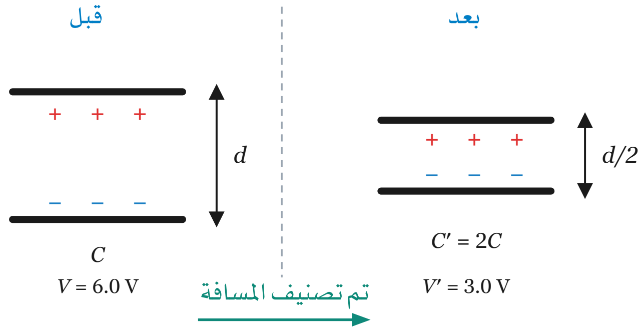
صندوق المعادلات:

شحنة المكثف	$Q = CV$. الوحدة $(C = FV)$.
البادئات	$1\ \mu\text{F} = 10^{-6}\ \text{F},\ 1\ \text{pF} = 10^{-12}\ \text{F}$.
الهندسة	السعة (C) تتناسب طرديًا مع المساحة / المسافة؛ بتقسيم المسافة على اثنين نحصل على $C' = 2C$.
تغير الحالة	عند فصل البطارية: Q ثابتة، $V' = \frac{Q}{C'}$. عند توصيل البطارية: V ثابتة، $Q' = C'V$.

مثال محلول:

الموقف:	مكثف ذو لوحين متوازيين سعته 4.0 μF وبينهما فراغ، شُحن ببطارية 6.0 V. (ا) بعد فصل البطارية نُصفت المسافة؛ عيّن فرق الجهد V'. (ب) مع بقاء البطارية متصلة نُصفت المسافة؛ عيّن الشحنة Q'.
المعطيات والمطلوب:	$C = 4.0\ \mu\text{F} = 4.0 \times 10^{-6}\ \text{F}$، و$V = 6.0\ \text{V}$. (ا) تم فصل البطارية، وتم تقليل المسافة إلى النصف؛ أوجد V'. (ب) تم توصيل البطارية، وتم تقليل المسافة إلى النصف؛ أوجد Q'.
التمثيل:	انظر الشكل 2-6-3 لمعرفة كيف يؤثر تقليل المسافة بين الصفائح إلى النصف على السعة. ارسم شكل الصفائح قبل وبعد تقليل المسافة إلى النصف (الشكل 2-6-5).
الاستراتيجية:	نحسب الشحنة الأصلية من $Q = CV$. يؤدي تقليل المسافة إلى النصف إلى مضاعفة السعة، $C' = 2C$. عند فصل البطارية تثبت Q فنستخدم $V' = Q/C'$، وعند اتصالها يثبت V فنستخدم $Q' = C'V$.

الحل الموضح:	الشحنة بعد الشحن: $Q = CV = (4.0 \times 10^{-6}) \times 6.0 = 2.4 \times 10^{-5}\ C$. عند تنصيف المسافة: $C' = 2C = 8.0 \times 10^{-6}\ F$. (أ) البطارية مفصولة، لذلك Q ثابت: $V' = Q/C' = (2.4 \times 10^{-5}) \div (8.0 \times 10^{-6}) = 3.0\ V$. (ب) البطارية متصلة، لذلك $V = 6.0\ V$ ثابت: $Q' = C'V = (8.0 \times 10^{-6}) \times 6.0 = 4.8 \times 10^{-5}\ C$.
منطقية الحل:	عند ثبات Q ومضاعفة C ينصف V من 6.0 إلى $3.0\ V$. وعند ثبات V ومضاعفة C تتضاعف Q من 2.4×10^{-5} إلى $4.8 \times 10^{-5}\ C$.
فسِّرها بنفسك:	لماذا يحافظ فصل البطارية على Q، بينما يحافظ اتصالها على V؟



وصف الشكل (5.6.2): المكثف قبل تنصيف المسافة وبعده؛ تصبح الفجوة $d/2$ والسعة 2C. وعند فصل البطارية تثبت الشحنة فينخفض الجهد من 6.0 إلى $3.0\ V$.

حاول بنفسك: مكثف سعته $2.0\ \mu F$ شُحن ببطارية $12\ V$. فُصلت البطارية ثم نُصفت المسافة. أوجد فرق الجهد الجديد.

حاول:

(أ) عند تطبيق $30\ V$ على مكثف سعته $6.0\ \mu F$، عيّن شحنته لأقرب رقمين عشريين.

(ب) مكثف ذو لوحين متوازيين سعته $20\ pF$ شُحن ببطارية $15\ V$. (أ) بعد فصل البطارية ضوعفت المسافة؛ عيّن Q_1 و V_1. (ب) مع اتصال البطارية ضوعفت المسافة؛ عيّن Q_1 و V_2. أعطِ الإجابات لأقرب رقمين عشريين.

ملاحظة:

عند فصل البطارية، تكون الشحنة Q ثابتة، لذا $V = Q/C$. عند توصيل البطارية، يكون الجهد V ثابتًا، لذا $Q = CV$.

في سياق جديد

يعتمد فلاش الكاميرا الإلكتروني على مكثف. بين اللقطات تشحن بطارية المكثف ببطء إلى جهد مرتفع، فيختزن $Q = CV$. وعند فتح الغالق يفرغ المكثف شحنته خلال أنبوب الفلاش في جزء صغير من الثانية، فينتج وميضًا شديدًا لا تستطيع البطارية الصغيرة توفيره لحظيًّا. وتعتمد أجهزة إزالة الرجفان المستخدمة لإعادة تشغيل القلب على نفس فكرة التخزين ثم الإطلاق.

دورك الآن: يستخدم فلاش كاميرا مكثفًا سعته $100\ \mu\text{F}$ مشحونًا إلى $300\ \text{V}$.

استخدم $Q = CV$ لإيجاد الشحنة.

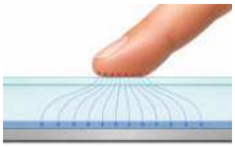
وصف الشكل (6.6.2): تشحن بطارية صغيرة مكثفًا كبيرًا ببطء، ثم يطلق المكثف شحنته فجأة خلال أنبوب الفلاش.

طبيعة العلم: من الأصل – شاشات اللمس في الهواتف

تعمل الشاشة بطريقة اللمس السعوي؛ يوجد مجال كهربائي ضعيف على سطحها، وعند لمس الإصبع يتكون مكثف صغير بينه وبين الشاشة، فيتغير مقدار الشحنة المختزنة، أي السعة. يقرأ حساس هذا التغير لتحديد موضع اللمس.

هذا مثال على تحويل كمية غير مرئية إلى قياس؛ فالإصبع يغير سعة أصغر من أن تُحس، لكن الجهاز يكتشفها بثبات ويحولها إلى موضع. وتصبح الكمية مفيدة علميًّا عندما توجد طريقة واضحة لقياسها، لا عندما يمكن رؤيتها فقط.

دورك: اقترح جهازًا يوميًّا آخر يعمل باكتشاف تغير في الشحنة المختزنة، واذكر الكمية التي يقيسها فعليًّا.



وصف الشكل (7.6.2): يكوّن لمس الشاشة مكثفًا صغيرًا بين الإصبع والسطح، ويقرأ الحساس تغير الشحنة بوصفه موضع اللمس.

سؤال الدرس، وإجابته:

يخزن المكثف الكهرباء؛ يحمل قطبان متقابلان شحنة $Q = CV$ تظل مختزنة عند فصل البطارية، ثم تخرج في صورة تيار عند توصيل اللوحين بدائرة. وتتحدد السعة C بالفاراد من مساحة اللوحين والمسافة بينهما، فيمكن ضبط الجهاز ليختزن مقدار الشحنة المطلوب.

المشهد الذى بدأنا منه

تمرين:

١. طُبق جهد $15\ \text{V}$ على مكثف سعته $3.0\ \mu\text{F}$. عيّن الشحنة لأقرب رقمين عشريين.

٢. طُبق جهد $60\ \text{V}$ على مكثف سعته $5.0\ \text{pF}$. عيّن الشحنة لأقرب رقمين عشريين.

٣. مكثف سعته $3.0\ \mu\text{F}$ شُحن ببطارية $20\ \text{V}$.

(أ) بعد فصل البطارية نُصفت المسافة؛ عيّن Q_1 و V_1.

(ب) مع اتصال البطارية نُصفت المسافة؛ عيّن Q_2 و V_2.

٤. مكثف سعته $40\ \text{pF}$ شُحن ببطارية $20\ \text{V}$.

(أ) بعد فصل البطارية ضوعفت المسافة؛ عيّن Q_1 و V_1.

(ب) مع اتصال البطارية ضوعفت المسافة؛ عيّن Q_2 و V_2. أعط الإجابات لأقرب رقمين عشريين.

الفصل الثالث

التيار الكهربي والدوائر

٣-١ الأميتر والفولتميتر .

٣-٢ قوانين كيرشوف .

٣-١ — الأميتر والفولتميتر

؟ سؤال الدرس:

كيف يمكن للأميتر أو الفولتميتر قياس تيارات وفروق جهد كهربى تتجاوز بكثير مدى القياس الخاص بهما؟

ستتعلم أن:

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

① توصّيل الأميتر على التوالي والفولتميتر على التوازي، وتفسّر لماذا يحتاج الأميتر إلى مقاومة داخلية صغيرة بينما يحتاج الفولتميتر إلى مقاومة كبيرة.

② زيادة مدى الجلفانومتر بمقاومة (مجزيء التيار) يتم توصيلها على التوازي، مستخدمًا شرط تساوي فرق جهد وقانون أوم لإيجاد قيمة مقاومة مجزيء التيار.

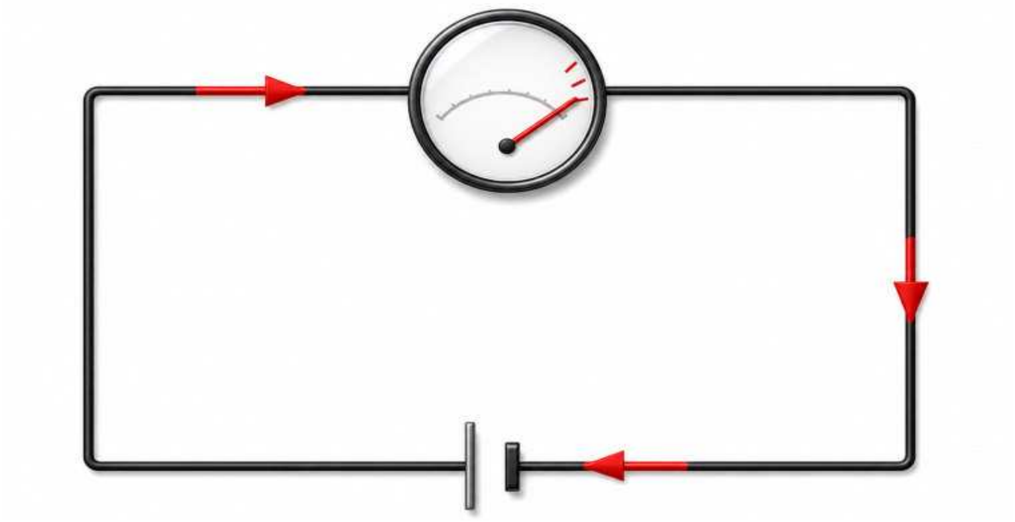
③ زيادة مدى الجلفانومتر بمقاومة (مضاعِف الجهد) يتم توصيلها على التوالي، مستخدمًا شرط تساوي التيار وقانون أوم لإيجاد قيمة مقاومة مضاعِف الجهد.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر

جلفانومتر صغير مُدرَّج مصمم ليقرأ حتى 10 mA على الأكثر، ومع ذلك تحتاج إلى قياس تيار مقداره 200 mA في دائرة. عند مرور التيار كله مباشرة فى الجلفانومتر يتسبب فى ان المؤشر يتحرك إلى ما بعد الحد الاقصى بكثير وقد يحرق الملف. ومع ذلك، تقرأ أجهزة القياس الحقيقية في الورش تيارات وفروق جهد أكبر مئات المرات من مدى الجهاز (الحد الأقصى) الذي يسمح به المؤشر-- وحده دون أن تتلف.

فكرة أساسية

يُوصل الأميتر في مسار الدائرة، بينما يُوصل الفولتميتر على التوازي؛ ولكل منهما مقاومة داخلية خاصة به. فما هي قيمة هذه المقاومة التي تضمن أن يعكس المقياس حالة الدائرة الفعلية دون أن يغير خصائصها؟ وكيف يمكن عملية القياس تُسجّل قراءةً تتجاوز الحد الأقصى لمدى تدريجها؟



شكل (1.2.1) مؤشر جلفانومتر يقيس أقصى تيار 10 mA وُضِع مباشرة في فرع يمر به تيار 200 mA، فتجاوز المؤشر نهاية التدريج

تنبأ:

(أ) لتمكين جهاز قياس (مؤشر) أقصى تيار يقيسه 10 مللي أمبير فقط من تسجيل تيار يساوى 200 مللي أمبير، أين ستُمرِّر التيار الزائد البالغ 190 مللي أمبير، وكيف ستصل ذلك المسار — على التوالي أم على التوازي مع جهاز القياس؟

لتمكين مؤشر سعته من تسجيل تيار خط مقداره ، أين ستوجّه الـ ، وكيف ستوصّل ذلك المسار — على التوالي أم على التوازي مع المؤشر؟

(ب) لقياس فرق جهد أكبر من مدى الفولتميتر، هل يتم إضافة مقاومة على التوالي أم على التوازي مع الجهاز.

استكشف — زيادة مدى ملّي-أميتر بمقاومة تحويل (مجزيء تيار)

ما ستفعله: توصّل عدة مقاومات قيمتهم صغيرة عبر ملّلي-أميتر وترى كم يزيد تيار الخط الذي يستطيع قراءته، فتكتشف نسبة تقسيم التيار التي تفرضها مقاومة مجزيء التيار.

الزمن: 15 دقائق

الأدوات:

- مؤشر ملّلي-أميتر معروف قيمة أقصى تياره
- أميتر مرجعى لقراءة تيار المسار الحقيقي
- مصدر تيار كهربى مستمر ومقاومة متغيرة لضبط التيار بأمان
- مجموعة مقاومات صغيرة القيمة لتجربتها كمقاومات مجزيء للتيار

مقاومة (مجزىء التيار)

مقاومة متغيرة (ريوستات)

مصدر تيار مستمر

أميتر

الخطوات:

١ دون تركيب أي مقاومة مجزيء التيار، ارفع جهد المصدر حتى يقرأ الملّي-أميتر المدى الكامل، وسجّل ذلك التيار Im.

٢ وصِّل مقاومة صغيرة مباشرة عبر طرفَي الجهاز، ثم اضبط المقاومة المتغيرة حتى يستقر الملّي-أميتر عند المدى الكامل ثانية.

٣ اقرأ تيار المسار I على الأميتر المرجعي، واحسب معامل المضاعفة $n = I / Im$.

٤ استبدل المقاومة بمجزىء للتيار أصغر وكرِّر الخطوات.

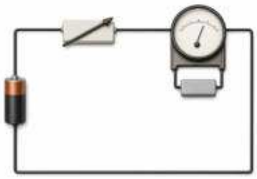
المحاولة	قراءة الجهاز (mA) Im	تيار المسار (mA) I	المعامل $n = I / Im$
١			
٢			
٣			

حلّل ما جمعته:

(أ) بإستخدام مقاومة مجزيء التيار أصغر، ماذا حدث للمعامل n، ومن ثمّ لقيمة تيار المسار التي تجاوزت المؤشر؟

(ب) الجهاز ومقاومة المجزىء التيار لهما نفس الطرفين (يشتركان فى نفس النقطتين) وبالتالى لهما نفس فرق جهد. استخدم ذلك للتنبؤ بأي مقاومة مجزىء ستوصلها لجعل المؤشر يقرأ تيار المسار يساوي 20 ضعف مداه.

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.


شكل (2.1.3) ملّلي-أميتر على التوالي مع مصدر ومقاومة متغيرة، (ريوستات) ومقاومة صغيرة موصّلة مباشرة عبر طرفَي الجهاز ليمر جزء من تيار الخط متجاوزًا مؤشر الجهاز

ملاحظة عملية

اقرأ الملّلي-أميتر والأميتر المرجعي في نفس اللحظة، وأبقِ المؤشر عند علامة أقصى مدى أو دونها بضبط المقاومة المتغيرة - لا مقاومة المجزيء - وبذلك لا يتعرض الملف للتشغيل اكبر من مداه مطلقا.

من الملاحظة إلى النموذج

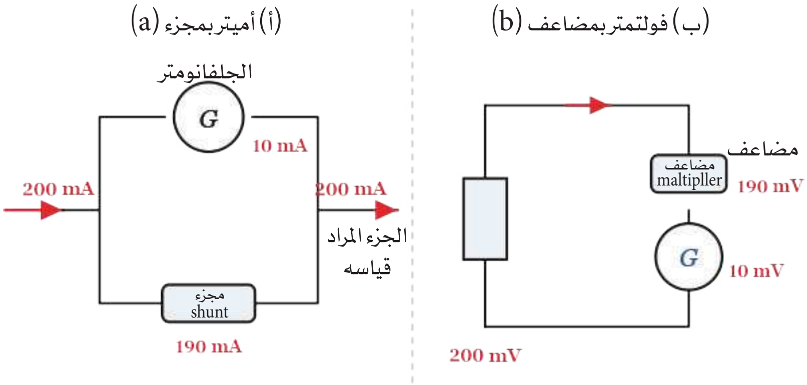
لماذا يجب أن يكون جهاز القياس غير مرئي تقريبًا (شبه خفى)

الغرض من أداة القياس هو أن قياس حالة الدائرة الكهربية كما هي، لا أن تعيد صياغتها؛ غير أن كلاً من هذه الأدوات يُحدث تغييراً في الدائرة بمقدار يعادل تماماً قيمة المقاومة التي تحتويها الأداة نفسها. فإذا قمت بقطع أحد فروع الدائرة ووضعت جهاز القياس في الفجوة الناشئة، فإنك بذلك تضيف مقاومةً إلى الفرع ذاته لقياس تياره؛ وحينها، ستكون القراءة التي يشير إليها المؤشر أقل من قيمة التيار الأصلي الذي كان يسري قبل التغيير حيث يكمن الفرق في نسبة تتحدد بناءً على مقارنة مقاومة الجهاز بالمقاومات الأخرى الموجودة في ذلك الفرع. لذا، يجب تقليل هذه المقاومة إلى أدنى حد ممكن (أي جعلها تقترب من الصفر).ومع ذلك،يترتب على الأمر حدوث ضرر؛ إذ إن توصيل جهاز القياس بالتوازى مع أحد المكونات يوقعك في الخطأ المعاكس: فأنت بذلك تفتح أمام التيار مساراً بديلاً، وأي جزء من التيار يمر في هذا المسار لن يصل إلى المكون الأصلي، مما يؤدي إلى انخفاض الجهد عبره. ويكمن الحل في النقيض تماماً: أي جعل المسار البديل صعباً وشاقاً للغاية لدرجة لا تجعل أي تيار-أو تكاد- يختاره. وعليه، فإن القاعدتين المذكورتين لا تمثلان حقيقتين منفصلتين للحفظ، بل هما وجهان لفكره واحدة؛ فجهاز القياس يكتسب دقة قراءته من خلال «سحب» أقل قدر ممكن من الكمية التي لا يقوم بقياسها.

نطاق القياس

لا يؤدى أيٌّ من الحلين إلى زيادة المدى بذاته؛ فالمؤشر ما زال يحترق فوق مداه وزيادة المدي يعني إرسال الزائد إلى مكان آخر وقراءة القيمة الثابتة المتبقية فقط. صل مقاومة صغيرة بجانب الأميتر ينقسم الخط عند ذلك التقاطع. ويبدأ الطريقان وينتهيان عند نفس الطرفين ، فلا بد أن يكونا لهما نفس فرق جهد — ثم يقسم قانون أوم التيار بينهما بالنسبة العكسية لمقاومتيهما. أعطِ المجزىء(المم الجانبي) تُسع مقاومة الجهاز، يحمل تسعة أمثال تياره، فتصل عشرة أجزاء ويظهر المؤشر جزءًا واحدًا. وضع مقاومة كبيرة أمام الفولتميتر وستظهر الصورة المعكوسة: مسار واحد، وبالتالي تيار واحد، وبالتالي جهد مقسم.

بالتناسب الطردى مع المقاومات ، والزائد يهبط خارج الجهاز بلا ضرر. ولكل تصميم شرط ليس أكثر من تعريف لتوصيله، وقانون أوم يحول التعريف إلى رقم.


(أ) أميتر بمجزء (a)
(ب) فولتمتر بمضاعف (b)

شكل (3.1.3) الترتيبان جنبًا إلى جنب، ليُقرأ التماثل بينهما بنظرة واحدة: على اليمين تكون المقاومة المضافة على التوالى مع الجهاز، فتُلزم الاثنين بتقسيم فرق جهد وتدعهما يقسمان تيارًا؛ وعلى اليسار تكون المقاومة المضافة أمام الجهاز، فتُلزمهما بتقسيم تيار وتدعهما يقسمان فرق جهد. كل شرط من شروط التصميم هو ببساطة خاصية التوصيل الخاص به — وهذا هو المنطق الذي يتركه الشكلان الواردان في «النقطة» ضمنيًا

مصطلح

المُجَـزِّئ (Shunt) - وهو المسار الجانبي المُركَّب بجانب الحركة.
لاحظ التكلفة المترتبة على ذلك:
فالعداد الآن لا يقيس سوى جزء ثابت من تيار المسار، ولذا يجب ضرب كل قراءة في معامل معين،
وتتوقف دقة النتيجة النهائية على دقة تلك المقاومة المنخفضة القيمة. فالمُجَزِّئ الذي تتغير قيمته بتأثير الحرارة يُقلل من دقة كل قراءة.
المُضاعِف(Multiplier) - وهو المكوّن الساحب للجهد، والمُركَّب قبل آلية الحركة. إنه يُتيح توسيع نطاق القياس مقابل سحب تيار أصغر فأصغر من الدائرة الخاضعة للاختبار (وهو أمر مرغوب فيه)، ولكنه يفرض وجود مقاومة كبيرة وحساسة لدرجة الحرارة في مسار القياس (وهو أمر غير مرغوب فيه).

حقيقة أساسية

يُستمد معامل التوسيع من نسبة المقاومة وحدها. ففي حالة استخدام مقاومة تحويل (bypass) قيمتها r بالتوازي مع مقاومة داخلية قيمتها R، يكون تيار الخط مساوياً لـ (1 + R/r) ضعف القيمة التي يشير إليها المؤشر؛ ومن ثم، يتطلب معامل توسيع مقداره 20 أن تكون $r = R/19$. أما في حالة الفولتميتر، فتنعكس النسبة: إذ يصبح الجهد المطبّق مساوياً لـ(1 + r/R) ضعف القراءة، ولذا يتطلب المعامل نفسه (أي 20) أن تكون $r = 19R$.

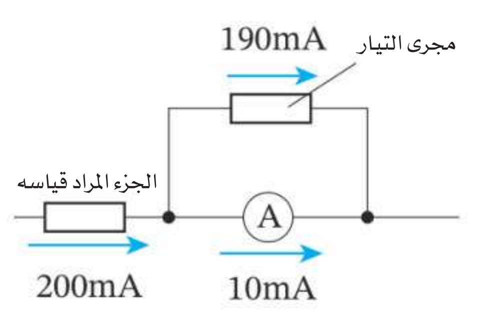
نقطة

! لقياس التيار المار في جزء معيّن من دائرة، يُوصَّل الأميتر على التوالي.

وللأميتر مقاومة داخلية. ولتقليل أثرها على التيار المار في الجزء المراد قياسه، ينبغي أن تكون المقاومة الداخلية أصغر ما يمكن.

! لزيادة مدى قياس جلفانومتر، تُوصَّل مقاومة على التوازي معه للسماح لجزء من التيار بتجاوزه. وتُسمى هذه المقاومة مقاومة المجزيء (**shunt**).

مثال: عندما تريد قياس تيار حتى 200 **mA** بجلفانومتر يقيس حتى 10 **mA**، فإذا مر 10 **mA** من التيار في الجلفانومتر وسُمح لـ 190 **mA** الباقية بتجاوزه عبر مقاومة المجزيء، يكون التيار الكلي 20 مرة مثل القيمة التي يقيسها الجلفانومتر.



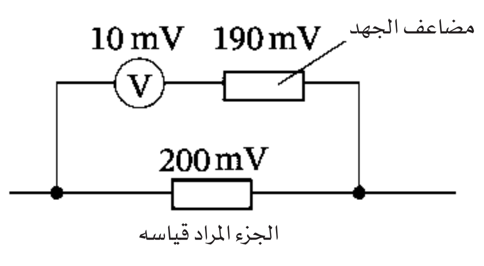
شكل (3-1-4) توصيل مقاومة المجزيء، منقول من الأصل: ملف الجهاز (الجلفانومتر) ومقاومة صغيرة (المجزىء) لهما نفس نقطتي التوصيل (متصلان على التوازي)، لذا فإن الخط القادم من اليمين ينقسم بين الفرعين ثم يتحد مرة أخرى على اليسار. تشير علامات الأسهم إلى التقسيم الخاص بالمثال الموجود بجانبه.

! لقياس الفرق جهد في جزء معيّن من دائرة، يُوصَّل الفولتميتر على التوازي.

وللفولتميتر مقاومة داخلية. وبما أنه يُوصَّل على التوازي مع الجزء المراد قياسه، ينبغي أن يكون التيار المار فيه أصغر ما يمكن. ولهذا الغرض ينبغي أن تكون مقاومته الداخلية أكبر ما يمكن.

! لزيادة مدى قياس جلفانومتر، تُوصَّل مقاومة على التوالي معه لإسقاط جزء من الفرق جهد. وتُسمى هذه المقاومة مضاعِف الجهد.

مثال: عندما تريد قياس فرق جهد حتى 200 **mV** بجلفانومتر يقيس حتى 10 **mV**، فإذا طُبِّق 10 **mV** من فرق الجهد على الجلفانومتر وأُسقِط الـ 190 **mV** الباقية عبر المضاعِف، تكون فرق الجهد الكلية 20 مرة مثل القيمة التي يقيسها الجلفانومتر.

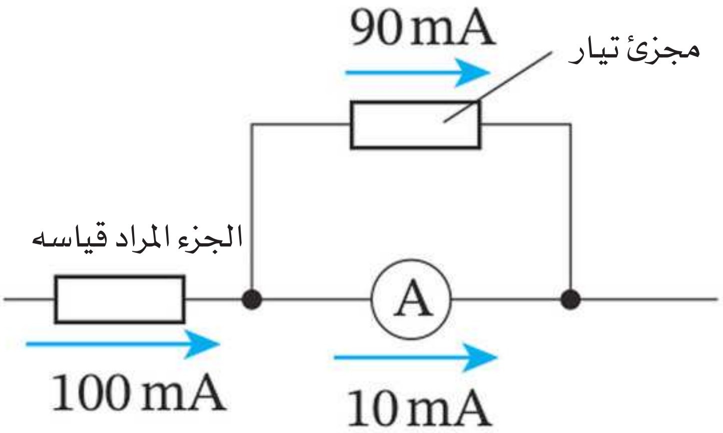


شكل (3-1-5) توصيل المضاعِف، منقول من الأصل: الجهاز والمقاومة يقعان أحدهما خلف الآخر على طول فرع واحد، وهو نفسه متصل عبر المكوّن قيد الاختبار، بحيث يمر تيار واحد عبر كليهما، وتوضح الملصقات كيفية توزيع الجهد المطبق البالغ 200 mV

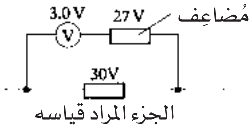
صندوق المعادلات:

الأميتر ومقاومة المجزيء	الأميتر على التوازي، فرق الجهد لهما متساويان $I_g R_g = I_s R_s$، حيث $I_s = I - I_g$ حيث sI: التيار المار خلال مقاومة المجزيء، Ig: التيار المار خلال الجلفانومتر، I: التيار الكلى (تيار المسار).
الفولتميتر والمضاعِف	على التوالي، التياران متساويان: $\frac{V_g}{R_g} = \frac{V_m}{R_m}$، حيث $V_m = V - V_g$ حيث V_g: فرق الجهد عبر مقاومة الجلفانومتر، V_m: فرق الجهد عبر المضاعف، V: الجهد المطبق (الجهد الكلي).
قانون أوم	$V = IR$

مثال محلول:



شكل 3-1-6 المثال المحلول (a): مقاومة مجزيء التيار بجانب الجلفانومتر G تحمل 90 mA من تيار الخط البالغ 100 mA، فتظل الإبرة تقرأ قيمة مداها الكامل 10 mA فقط.



شكل 3-1-7 المثال المحلول (b): مقاومة مضاعِف على التوالي مع الجلفانومتر يأخذ 27 V من الـ 30 V المطبَّقة المراد قياسها، تاركًا 3.0 V عبر الجهاز نفسه.

الموقف:	أوجد ما يلي: (أ) جلفانومتر مقاومته الداخلية 1.8 Ω يستطيع القياس حتى 10 mA. لقياس تيارات حتى 100 mA باستخدامه، أوجد المقاومة المطلوبة لمقاومة المجزىء بالأوم. (ب) يوجد جلفانومتر مقاومته الداخلية 3.0 kΩ يستطيع قياس فروق جهد حتى 3.0V. لقياس فروق جهد حتى 30V باستخدامه، أوجد المقاومة المطلوبة للمضاعِف بالكيلوأوم.
المعطيات والمطلوب:	(أ) مقاومة داخلية 1.8 Ω، مدى الجهاز الكامل 10 mA، المدى المستهدف 100 mA؛ أوجد مقاومة المجزيء [Ω] R_s. (ب) مقاومة داخلية 3.0 kΩ، مدى الجهاز الكامل 3.0V، المدى المستهدف 30V؛ أوجد مقاومة المضاعِف [kΩ] R_m.
التمثيل:	الشكل أعلى الجدول هو الجزء (a): الجلفانومتر ومقاومة التحويل على التوازي، وخط الـ 100 mA ينقسم بينهما 90 mA/10mA. والشكل 3-1-7 هو الجزء (b): الجلفانومتر والمضاعِف على التوالي، يتقاسمان تيارًا واحدًا.

الاستراتيجية:	مقاومة المجزيء التي تعمل على زيادة مدى الجلفانومتر تُوصَّل على التوازي، فأقم معادلة بقانون أوم من شرط تساوي فرق الجهد عبر الجهاز ومقاومة المجزيء. والمضاعِف الذي يعمل على زيادة مدى الجلفانومتر يُوصَّل على التوالي، فأقم معادلة من شرط تساوي التيار في الجهاز والمضاعِف.
الحل الموضح:	(أ) بما أن الجلفانومتر ومقاومة المجزيء على التوازي، فإن فرق الجهد لهما متساويان. وعندما يمر تيار 100 mA في الجزء المراد قياسه، ينبغي أن يسري 10 mA في الجلفانومتر و 90 mA في مقاومة المجزيء. لتكن مقاومة المجزيء $R_s\ [\Omega]$. من قانون أوم: $1.8 \times 10 = R_s \times 90$ $R_s = \frac{18}{90} = 0.20\ \Omega$ (ب) بما أن الجلفانومتر والمضاعِف على التوالي، يتساوى التياران المارّان فيهما. وعندما تُطبَّق فرق جهد 30 V على الجزء المراد قياسه، ينبغي أن يُطبَّق 3.0 V على الجلفانومتر و27 V على المضاعِف. لتكن مقاومة المضاعِف $Rm\ (K\Omega)$. $\frac{3}{3} = \frac{27}{R_m}$ $R_m = \frac{3 \times 27}{3} = 27\ k\Omega$
منطقية الحل:	(أ) يجب أن تحمل مقاومة التحويل 9 أضعاف تيار الجهاز عند الفرق جهد نفسها، فينبغي أن تكون مقاومتها تُسع $1.8\ \Omega$، و$1.8/9 = 0.20\ \Omega$ تنطبق. (ب) يجب أن يُسقِط المضاعِف 9 أضعاف فرق جهد الجهاز عند التيار نفسه، فينبغي أن تكون مقاومته 9 أضعاف $3.0\ k\Omega$، و$9 \times 3.0 = 27\ k\Omega$ تنطبق.
فسِّرها بنفسك:	في جملة واحدة، قل لماذا تستخدم معادلة مقاومة التحويل تساوي الفرق جهد بينما تستخدم معادلة المضاعِف تساوي التيار.

والآن حاول أنت: جلفانومتر مقاومته الداخلية 4.0 Ω يقرأ حتى 5.0 mA. أوجد مقاومة التحويل اللازمة ليقرأ حتى 25 mA.

حاول:

(أ) يوجد جلفانومتر مقاومته الداخلية 3.0 Ω يستطيع القياس حتى 1.0 A. لقياس تيارات حتى 3.0 A باستخدامه، أوجد المقاومة المطلوبة لمقاومة المجزيء بالأوم.

(ب) يوجد جلفانومتر مقاومته الداخلية 3.0 kΩ يستطيع قياس فروق جهد حتى 5.0 V. لقياس فروق جهد حتى 30 V باستخدامه، أوجد المقاومة المطلوبة للمضاعِف بالكيلوأوم.

شكل (3-1-8) جهاز مركزي واحد يُعاد استعماله لكل مدى، مع مقاومات مجزيء قصيرة سميكة منخفضة المقاومة موصّلة على التوازي لنطاقات (مدى) التيار، ومضاعِفات طويلة رفيعة عالية المقاومة موصّلة على التوالي لنطاقات (مدى) فرق الجهد، يُختار منها واحد في كل مرة بالمفتاح الدوّار.

في سياق جديد

يُخفي المتعدد الرقمي الحديث (modern multimeter) الفكرة نفسها داخل مفتاحه الدوّار. فإدارة الجهاز إلى مدى تيار أعلى توصل ببساطة مقاومة مجزيء أصغر عبر الجهاز الداخلي نفسه، فيتجاوزه قدر أكبر من تيار الخط؛ وإدارته إلى مدى فرق جهد أعلى تُدخِل مضاعِفًا أكبر على التوالي، فتُسقط قيمة أكبر من فرق الجهد المطبَّق خارج المؤشر. فجهاز حساس واحد صغير يُعاد استعماله عبر حدود تمتد أُسسًا عشرية عديدة، وذلك بمجرد اختيار المقاومات.

دورك الآن: جهاز أقصى قراءة لمؤشره حتى 50 mV. ما مقاومة مضاعِف الجهد المتصلة على التوالي، وتجعل مداه يصل حتى 500 mV إذا كان الجهاز يمر به 1.0 mA عند المدى الكامل؟

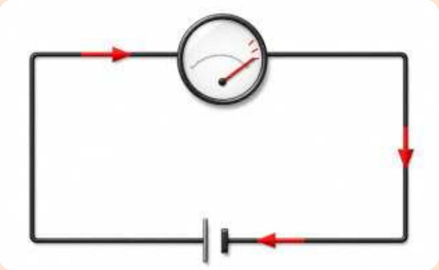
طبيعة العلم: من الأصل — المقاومة الداخلية للأميتر والفولتميتر.

الأميتر المثالي مقاومته الداخلية $0\ \Omega$، والفولتميتر المثالي مقاومته الداخلية لانهائية. والغرض من ذلك ضمان ألا يزيد توصيل الأميتر على التوالي المقاومة الكلية للدائرة، وأن يمنع توصيل الفولتميتر على التوازي مرور تيار غير ضروري إليه. وتُصمَّم الأجهزة الفعلية أيضًا لتقترب من هذين المثالين. والأميتر المثالي والفولتميتر المثالي نموذجان قياسيان (محددان): لا يبلغ جهاز حقيقي $0\ \Omega$ ولا مقاومة لانهائية، ومع ذلك يدفع المهندسون كل تصميم نحو مثاله حتى يصير الاضطراب المتبقي صغيرًا بما يكفي لإهماله في القياس المطروح. فجهاز القياس الجيد هو الذي يُبلِّغ عن كمية وهو يغيّرها أقل ما يمكن.

والمؤشر في قلب هذه الأجهزة هو الملف المتحرك لدارسونفال وديبريه، المبني عام 1882، الذي جعله ويستون محمولًا ودقيقًا بما يكفي لبيعه عام 1888. والتقدّم في الفيزياء كثيرًا ما يكون تقدّمًا في الأجهزة: فالكمية لا تصير عادية إلا حين يوجد ما يقرؤها بثقة.

دورك الآن: اقترح قياسًا واحدًا تُغيِّر فيه المقاومة الداخلية المحدودة لفولتميتر القراءة تغييرًا ملحوظًا، وقل أي خاصية في الدائرة تجعل الأثر كبيرًا.

سؤال الدرس، وإجابته:



المشهد الذى بدأنا به

الطريقة هي إبقاء قيمة صغيرة ثابتة فقط من الكمية داخل مؤشر الجهاز وتحويل الباقي خلال مقاومة مضافة. فللتيارات الكبيرة، فالتيار الزائد تحمله مقاومة مجزيء صغيرة المقاومة متصّلة على التوازي، ويُحدَّد مقدارها بتساوي فرق الجهد؛ ولفروق الجهد الكبيرة، فرق الجهد الزائد يكون عبر مقاومة مضاعِف كبيرة (عالية) المقاومة متصّلة على التوالي، ويُحدَّد مقداره بتساوي التيار. وفي الحالتين يُحسب من قانون أوم قيمة المقاومة المضافة.

تمرين:

(أ) يوجد جلفانومتر مقاومته الداخلية $9.0\ \Omega$ يستطيع القياس حتى $30\ \text{mA}$. لقياس تيارات حتى $300\ \text{mA}$ باستخدامه، أوجد المقاومة المطلوبة لمقاومة المجزيء بالأوم.

(ب) يوجد جلفانومتر مقاومته الداخلية $2.0\ \text{k}\Omega$ يستطيع قياس فروق جهد حتى $5.0\ \text{V}$. لقياس فروق جهد حتى $50\ \text{V}$ باستخدامه، أوجد المقاومة المطلوبة للمضاعِف بالكيلوأوم.

(جـ) املأ الفراغات في الجمل التالية. لقياس التيار المار في جزء معيّن من دائرة، يُوصَّل الأميتر على (i). وينبغي أن تكون المقاومة الداخلية للأميتر (ii) ما يمكن. ولقياس فرق الجهد في جزء معيّن من دائرة، يُوصَّل الفولتميتر على (iii). وينبغي أن تكون المقاومة الداخلية للفولتميتر (iv) ما يمكن.

الدرس ٣-٢ — قانونا كيرشوف

؟ سؤال الدرس:

في دائرة يتفرّع فيها التيار بطرق معقّدة، ما هى العلاقات التى تربط بين التيارات المارة وفروق الجهد في كل مسار؟

ستتعلم

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. تميّز انخفاض الجهد عبر المقاومة وارتفاع الجهد من المصدر، وتحسب كلًّا منهما من الكميات المعطاة.

٢. تكتب معادلة العقدة لأي نقطة تلتقي عندها الفروع، مستخدمًا قانون كيرشوف الأول (KCL).

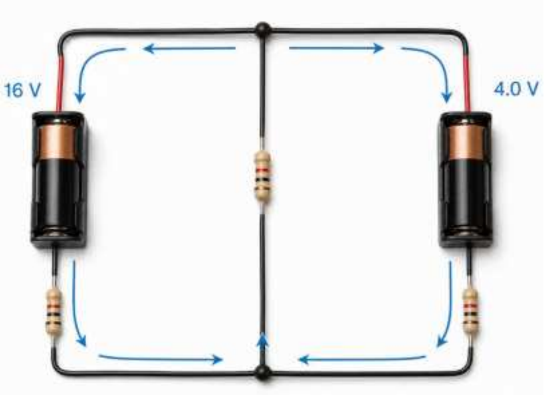
٣. تكتب معادلة المسار لأي مسار مغلق، مستخدمًا قانون كيرشوف الثاني (KVL)، وتحل مجموعة المعادلات الآنية لإيجاد تيار كل فرع — متخذًا الاشارة السالبة على أنه اتجاه معاكس.

فكرة أساسية:

كل سلك يلتقي عند عقدة يحمل تيار فرعه I (A)، وعليك أن تختار اتجاهًا لكل منها قبل أن تجمع التيارات.

الظاهرة — توقّع قبل أن تستمر

بطاريتان القوة الدافعة الكهربية لهما مختلفة متصلتان بنفس المجموعة من المقاومات، وعند إحدى الوصلات تلتقي ثلاثة أسلاك، فيستطيع التيار أن ينقسم ثم يتجمع مرة أخرى. وتتشارك الحلقتان مقاومة واحدة. وقبل أن تحل شيئًا، انظر إلى الفرع الذي يحمل البطارية الأصغر.



شكل 1-2-3 • بطاريتان غير متساويتَي القوة الدافعة الكهربية تدفعان ثلاث مقاومات في حلقتين تتشاركان فرعًا أوسط وتلتقيان عند وصلة.

توقّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) في أي اتجاه يمر التيار في الفرع الذي يحمل البطارية الأصغر — فى نفس اتجاة التيار للبطارية الأكبر، أم عكسه؟

(ب) هل يمكن أن يتبين لك أن التيار في أحد الفروع يمر عكس الاتجاه الذي افترضته أولًا؟

استكشف — ارسم عملية العبور

ما ستفعله: تقيس تيارات الفروع الثلاثة حيث تلتقي حلقتان وتتحقق مما إذا كان التيار الداخل إلى العقدة يساوي فعلًا التيار الخارج منها.

الزمن: 20 دقيقة

ما تحتاجه (الأدوات):

- بطاريتان مختلفتا القوة الدافعة (مثلًا 9 V و 4.5 V)
- ثلاث مقاومات
- أميتر (يُنقل بين الفروع، أو ثلاثة)
- فولتميتر وأسلاك توصيل

فولتمتر

أميتر

مقاومة كهربائية

بطاريتان

الخطوات:

١ كوّن دائرة الحلقتين وارسم سهمًا مفترضًا للتيار في كل فرع من الفروع الثلاثة: I_1 و I_2 في الفرعين الخارجيين، و I_3 في الفرع الأوسط المشترك.

٢ ضع الأميتر في الفرع الخارجي الأول واقرأ I_1؛ ثم انقله إلى الفرع الخارجي الثاني لقراءة I_2، ثم إلى الفرع الأوسط لقراءة I_3.

٣ لكل محاولة احسب القيمة المشتقة $I_1 + I_2 - I_3$ وأدخلها في العمود الأخير.

٤ (اختياري) استخدم الفولتميتر لقِياس الانخفاض في الجهد عبر كل مقاومة والقوة الدافعة لكل بطارية، واجمعها في مسار مغلق واحد.

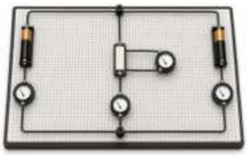
المحاولة	I_1 داخل (A)	I_2 داخل (A)	I_3 داخل (A)	$I_1 + I_2 - I_3$ (A)
١				
٢				
٣				

حلّل ما جمعته:

(أ) من العمود الأخير: ما القيمة الواحدة التي يظل $I_1 + I_2 - I_3$ قريبًا منها في كل محاولة، وماذا يخبرك ذلك عن مقدار الشحنة التي تتجمّع عند العقدة؟

(ب) إذا كان تيار أحد الفروع سالبًا، فماذا تعني إشارته، وهل تظل حالة التساوي بين التيارات عند العقدة قائمًا حين تُبقي تلك الإشارة؟ وتوقَّع هل يكون مجموع فروق الجهد والمقاسة بالفولتميتر متساو.

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.


شكل (3-2-2) دائرة اختبار ذات مسارين: بطاريتان في الفرعين الخارجيين، ومقاومة وسطى مشتركة، وأميتر (A) في كل فرع، وفولتميتر (V) عبر المقاومة.

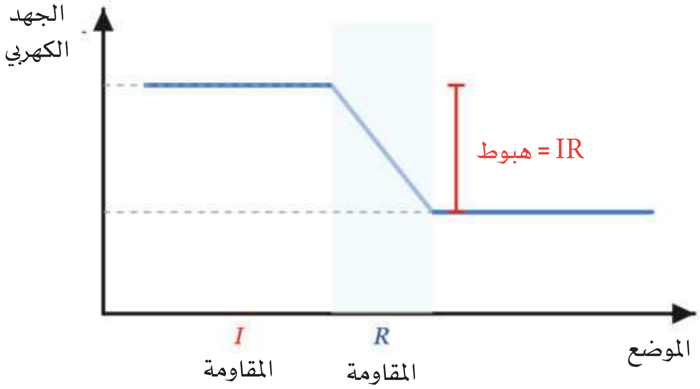
ملاحظة عملية:

وصّل الأميتر دائمًا على التوالي داخل الفرع والفولتميتر على التوازي عبر المكوّن (المقاومة أو البطارية). ولاحظ القراءة التي يظهرها جهازك: إذا قرأ فرع قيمة سالبة، فالتيار الحقيقي يمر في عكس اتجاهك المفترض — سجّله بإشارته، ولا تعكس الأطراف.

من الملاحظة إلى النموذج:

الانخفاض فى فرق الجهد والقوة الدافعة الكهربية:

تخيّل أن الجهد الكهربي هو الارتفاع والدائرة الكهربية هى مسار في تلال. فالمصدر هو الشيء الوحيد الذي يدفع الشحنة؛ وكل مقاومة يسمح لها بالانخفاض مرة أخرى. وقيمة كل انخفاض ليست كمية جديدة تُبحث عنها — فقانون أوم يحددها بالفعل، إذ إن R وI اللتين تحددان سلوك المقاومة تحددان أيضًا كم يجب أن ينخفض الجهد خلالها. وهذا هو كل مضمون الحدّ الأول المذكور في «نقطة»: الانخفاض فى الجهد يقاس بالفولت، يمكنك حساب قيمته بالفعل. والارتفاع فى جهد المصدر هو نظيره، ومن الجدير التدقيق فيما يقيسه، بل هو الطاقة التي يكتسبها كل كولوم في طريقه خلال المصدر. وبالنسبة لمصدر مثالي — أي مصدر لا توجد فيه مقاومة خاصة به يمر عبرها التيار — يظهر ذلك التسليم غير نقصان عند الطرفين، ولذلك يمكن قراءته باستخدام فولتميتر.



شكل 3-2-3 : الجهد الكهربي على طول موصّل: يظل ثابتًا، ثم يهبط درجةً بمقدار هبوط الفرق جهد RI عبر المقاومة R التي تحمل التيار I.

من أين تأتي القاعدتان (القانونين)؟

ليست أيٌّ من القاعدتين اكتشافًا جديدًا فى مجال الكهرباء؛ بل كل منهما قانون حفظ قديم في ثوب الدوائر. فالشحنة لا تُخلق ولا تفنى ولا تختزن عند نقطة في سلك، فمكان التقاء الفروع لا يسعه إلا أن يمرّر ما يصله — فما يصل في الثانية يجب أن يغادر في الثانية، وهذه هي القاعدة الأولى لا غير. والطاقة كذلك لا تُخلق ولا تفنى، والجهد طاقة لكل كولوم؛ فاحمل كولومًا واحدًا حول مسار مغلق كامل ولا بد أن يعود إلى الارتفاع الذي بدأ منه، فالارتفاع الذي ناله يجب أن يتطابق (يتساوى) مع الانخفاض الذى مر به. وهذه هي القاعدة الثانية.

ويتبع الإجراء الوارد في «الخلاصة» من هذا، وتعليماته الافتتاحية تستحق الانتباه. فأنت مطلوب منك اختيار الأسهم قبل أن تعرف شيئًا — والاختيار لا يمكن أن يكون خاطئًا، بل غير موفَّق فحسب. اختر اختيارًا بشكل غير صحيح يردّ عليك الجبر إشارة سالبة، وليست رسالة خطأ بل جواب: السهم رُسم معكوسًا، والمقدار صحيح. وهذا ما يجعل الطريقة آلية لا ذكية. فلست مضطرًا إلى استنتاج مسار التيار؛ بل تضع افتراضًا، وتكتب نوعَي المعادلات، وتدع الإشارات تصحح لك. وكل وصلة (عقدة) تعطي معادلة، وكل حلقة مستقلة تعطي أخرى، ومتى صار عدد المعادلات كعدد التيارات المجهولة يتم حل الدائرة.

فكرة أساسية:

كلتا الكميتين مقاسة بوحدة الفولت، وكلتاهما تؤولان إلى التطابق فى وحدات القياس:

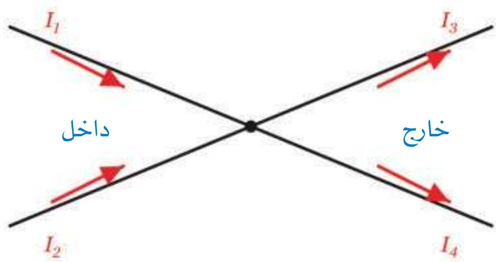
$1\,V = 1\,\Omega.A = 1\,J/C$

فمقاومة 20 Ω يمر بها 0,50 A يصبح فرق الجهد 10 V — جزء واحد من عشرة أجزاء طاقة كل كولوم يمر خلال المقاومة، يتحول إلى حرارة.

مصطلح:

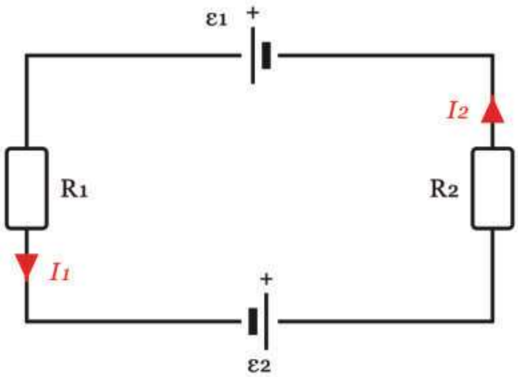
القوة الدافعة الكهربية: اسم معروف من القرن التاسع عشر ومضلِّل منذ ذلك الحين: فالكمية طاقة لكل وحدة شحنة، تقاس بالفولت، لا قوة بالنيوتن. ولاحظ أيضًا الحدّ المختبئ في الحالة المثالية أعلاه. فالبطارية الحقيقية تحمل مقاومة في داخلها، فتفقد جزءًا من الجهد الداخلي ويُظهر الطرفان أقل من الرقم الكامل — وكلما زاد التيار المسحوب زاد الجهد المفقود داخل البطارية. وكل حساب في هذا الدرس يفترض أن الجهد المفقود داخل البطارية يساوي صفر.

يوضح الشكلان أدناه تقاطعًا واحدًا وحلقة واحدة، مع المعادلة التي ينتجها كل منهما.



$I_1 + I_2 = I_3 + I_4$

شكل 3-2-4 • قانون كيرشوف الأول عند عقدة: التيارات الداخلة يساوي التيارات الخارجة، $I_1 + I_2 = I_3 + I_4$



$E_1 + E_2 = R_1I_1 + R_2I_2$

شكل 3-2-5: قانون كيرشوف الثاني حول حلقة مغلقة فيها مصدران ومقاومتان: $R_1I_1 + R_2I_2 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$.

ملاحظة:
خطأن في الحسابات. الأول: معادلة الحلقة لا تصح إلا إذا حافظت على اتجاه سير واحد متسق حولها كلها — فإذا عكس في منتصف الطريق تتغير ع إشارات الانخفاضات التي حسبتها من قبل بالفعل. والثاني: عُدَّ معادلاتك قبل أن تبدأ الحل: ثلاثة تيارات مجهولة تحتاج ثلاث معادلات مستقلة، وإعادة استعمال نفس الوصلة (العقدة) مرتين لا تقدّم جديدًا. بل مجرد إعادة ترتيب للمعلومات التي كانت لديك بالفعل. التيار لا يُستهلك أثناء مساره (تدفقه). ينص القانون الأول على العكس: كل ما يتدفق إلى نقطة تقاطع (عقدة) يتدفق منها خارجًا.
ما تستهلكه المقاومات هو الطاقة، وليس الشحنة.

نقطة

! عندما يمر تيار $I(A)$ خلال موصّل مقاومته $R(\Omega)$ يُسمى النقصان (الانخفاض) في الجهد بمقدار IR عبر المقاومة هبوط في فرق الجهد.

! يُسمى فرق الجهد بين طرفَي البطارية أو مصدر الطاقة بالقوة الدافعة الكهربية.

! عند النظر في الدوائر المعقّدة، استخدم قانونَي كيرشوف

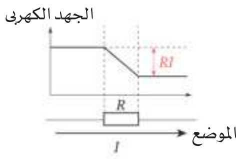
١ افترض اتجاه التيار.

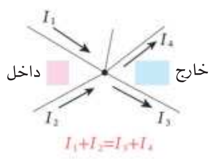
٢ قانون كيرشوف الأول. ركِّز على الوصلات (الأفرع) في الدائرة وأقم المعادلات.

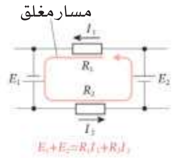
مجموع التيارات الداخلة = مجموع التيارات الخارجة

٣ قانون كيرشوف الثاني. ركِّز على مسار مغلق في الدائرة وأقم المعادلات.

مجموع القوى الدافعة الكهربية = مجموع الهبوط في فروق الجهد





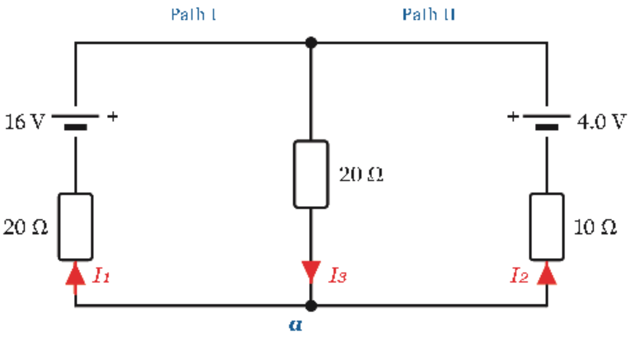


صندوق المعادلات:

هبوط فرق الجهد	$= IR$ (الوحدة: $V = A \cdot \Omega$)
القانون الأول بالرموز:	$\Sigma I_{in} = \Sigma I_{out} \Rightarrow$ للوصلة المرسومة أعلاه، $I_1 + I_2 = I_3 + I_4$
القانون الثاني بالرموز:	$\Sigma \varepsilon = \Sigma RI \Rightarrow$ للحلقة المرسومة أعلاه، $R_1I_1 + R_2I_2 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$.

مثال محلول:

الموقف:	تتكون دائرة من بطارية ومقاومات كما في الشكل 3-2-6: قوتان دافعتان كهربيتان 16 V و 4.0 V ، ومقاومة 20 Ω في المسار I، ومقاومة 20 Ω في الفرع المشترك، ومقاومة 10 Ω في المسار II، تلتقي عند الوصلة a. أوجد اتجاه ومقدار التيار المار خلال مقاومة 10 Ω.
المعطيات والمطلوب:	القوتان الدافعتان ε = 16V (المسار I) و4.0 V (المسار II)؛ المقاومات 20 Ω (المسار I)، و 20 Ω (المشترك)، و 10 Ω (المسار II). أوجد اتجاه ومقدار التيار في مقاومة 10 Ω.
التمثيل:	لتكن التيارات خلال المقاومات I_1 (المسار 20 Ω، I)، وI_2 (المسار 10 Ω، II)، وI_3 (المشترك، 20 Ω)، بالاتجاهات المفترضة في الشكل 3-2-6، وكلها تلتقي عند الوصلة a.
الاستراتيجية:	الخطوة 1: افترض اتجاهًا لكل تيار. الخطوة 2: طبّق قانون كيرشوف الأول عند الوصلة a. الخطوة 3: طبّق قانون كيرشوف الثاني على المسار I وعلى المسار II. ثم حل المعادلات الثلاث آنيًا.
الحل الموضح:	باستخدام قانون كيرشوف الأول عند النقطة α: $I_1 + I_2 = I_3 \ldots (i)$ باستخدام قانون كيرشوف الثاني للمسار I: $16 = 20 \times I_1 + 20 \times I_3 \ldots (ii)$ وللمسار II: $4.0 = 10 \times I_2 + 20 \times I_3 \ldots (iii)$ بحل المعادلات (i) و(ii) و(iii)، نجد أن: ، $I1 = 0.50\ A$ و $I2 = -0.20\ A$، و $I3 = 0.30\ A$. وبما أن قيمة I2 سالبة، فإن اتجاه التيار يعاكس الاتجاه المفترض. وعليه، فإن التيار المار عبر المقاومة 10 Ω يتجه لأسفل (عكس الاتجاه المفترض)، وبمقدار 0.20 A.
منطقة الحل:	بالتعويض عن $I_3 = (I_1 + I_2)$ في المعادلتين (ii) و(iii): تصبح المعادلة (ii) على الصورة $40I_1 + 20I_2 = 16$، أي $2I_1 + I_2 = 0.80$؛ وتصبح المعادلة (iii) على الصورة $20I_1 + 30I_2 = 4.0$، أي $2I_1 + 3I_2 = 0.40$. وبالطرح نحصل على $2I_2 = -0.40$، ومن ثم تكون $I_2 = -0.20$ أمبير، و$I_2 = 0.50$ أمبير، و $I_3 = 0.30$ أمبير — وهي نتائج تطابق الإجابات المذكورة أعلاه. وتتوافق القيمة السالبة لـ I2 مع حقيقة أن البطارية الأكبر في القوة الدافعة الكهربية تتغلب على البطارية الأصغر في القوة الدافعة الكهربية.
فسِّرها بنفسك:	في جملة واحدة، قل ماذا تخبرك القيمة السالبة لـ I_2 فيزيائيًا، ولماذا لا تعني أن خطأً قد وقع.

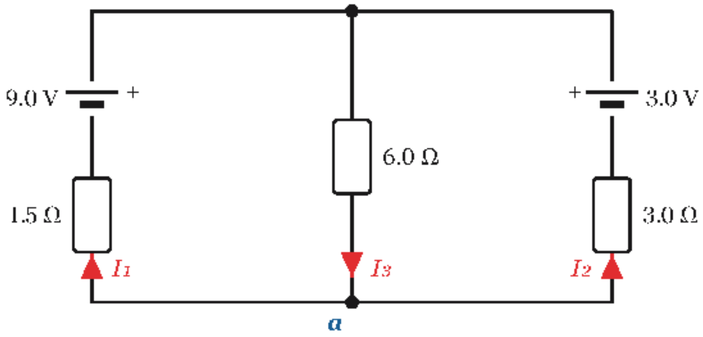


شكل 3-2-6 المثال المحلول: بطاريتان (16 V و 4.0 V) وثلاث مقاومات (20 Ω و 20 Ω و 10 Ω) تكوّن مسارين تتشاركان فرعًا أوسط يلتقيان عند الوصلة a؛ والتيارات المفترضة I_1 و I_2 و I_3.

حاول بنفسك: بطاريتان، 9.0 V و 6.0 V، تدفعان تيارًا إلى فرع مشترك؛ ويحمل كل فرع خارجي والفرع المشترك مقاومة 10 Ω أوجد التيار في المقاومة المشتركة.

حاول:

1. تتكون دائرة من بطارية ومقاومات كما في الشكل 3-2-7. أوجد اتجاه ومقدار التيار المار خلال كل مقاومة.

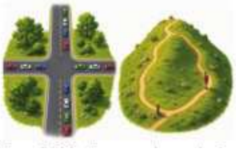


شكل 3-2-7 • جرِّب: بطاريتان 9.0 V و 3.0 V مع مقاومات 1.5 Ω و 6.0 Ω و 3.0 Ω في شبكة ذات مسارين — تتشارك بطارية 9.0 V فرعها مع مقاومة 1.5 Ω، وبطارية 3.0 V مع مقاومة 3.0 Ω، ومقاومة 6.0 Ω هي الفرع الأوسط المشترك.

في سياق جديد

يصف قانونا كيرشوف أكثر بكثير من الدوائر الكهربية. فقانونه الأول أشبه بعدّ السيارات عند تقاطع: عدد السيارات الداخلة يساوي عدد الخارجة، فتُحفَظ حركة المرور تمامًا كما يُحفَظ التيار عند وصلة. وقانونه الثاني أشبه بارتقاء ’طريق جبلي: إذا صعدت وهبطت وعدت إلى نقطة انطلاقك، كان اجمالى تغيّر ارتفاعك صفرًا — تمامًا كما أن اجمالي تغيّر جهد شحنة حول أي مسار مغلق يساوي صفر. وبهاتين القاعدتين وحدهما تستطيع تحليل أي شبكة طرق، مهما تشابكت، وأي دائرة مبنية على نفس المنوال نفسه.

دورك الآن: عند تقاطع، يجلب طريقان 400 و250 سيارة في الدقيقة، ويحمل طريق خروج واحد 300 سيارة في الدقيقة. باستخدام فكرة القانون الأول، كم سيارة في الدقيقة يجب أن تغادر عبر طريق الخروج المتبقي؟.



شكل 3-2-8 • تشبيهان من الحياة اليومية لقانونَي كيرشوف: عند وصلة طرق يوازن سيل السيارات الداخلة سيلَ الخارجة (قاعدة الوصلة)، بينما يشكّل درب قمة تلة مسار مغلق تعود إلى علامة بدايتها فيكون ناتج تغيّر الارتفاع حول الحلقة صفرًا (قاعدة المسار المغلق).

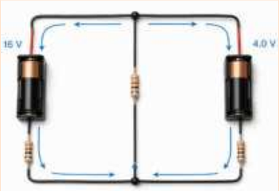
طبيعة العلم:

من الأصل — قانونا حفظ متنكّران. قانونا كيرشوف ليسا قوى جديدة ولا قياسات جديدة — بل هما قاعدتان حسابيتان تتبعان من مبادئ حفظ موثوقة أصلًا في الفيزياء. فالقانون الأول (العقدة) يعبّر عن حفظ الشحنة الكهربية: لا يمكن للشحنة أن تتراكم عند نقطة، فما يدخل يجب أن يخرج. والقانون الثاني (المسار المغلق) يعبّر عن حفظ الطاقة: الشحنة المحمولة مرة حول مسار مغلق تعود إلى الجهد نفسه، فالجهد الذي تمدّه المصادر يجب أن يساوي الجهد المفقود نتيجة انخفاضات فرق جهد عبر المقاومات.

ورؤية فكرة واحدة تظهر ثانيةً في صورة أخرى عادةٌ من عادات العلم الجيد: فقاعدة عن المرور، وقاعدة عن الارتفاع في رحلة سير، وقاعدة عن الدوائر، كلها العبارة نفسها عن الحفظ في ثياب مختلفة. وإدراك ذلك البناء المشترك هو ما يتيح لطريقة واحدة أن تحل مسائل تبدو غير مترابطة.

دورك الآن: اقترح أي قانون حفظ يعبّر عنه كل من قانونَي كيرشوف، واذكر حالة أخرى في الفيزياء يُستخدم فيها نفس قانون الحفظ.

سؤال الدرس، وإجابته:

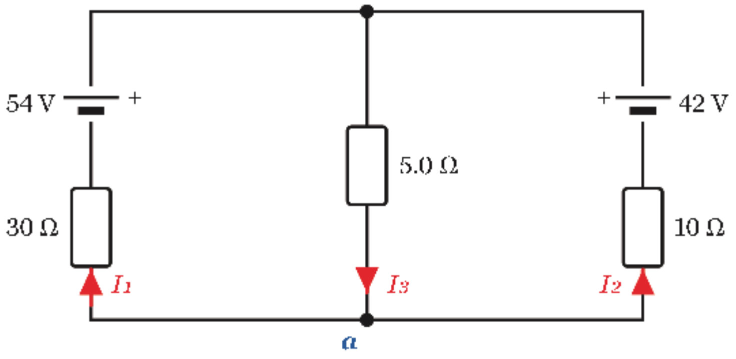


المشهد الذى بدأنا به

في دائرة متفرّعة يخضع التيار وفروق الجهد لقاعدتين (قانونين)، هما قانونا كيرشوف. فعند كل وصلة تتساوى التيارات الداخلة والتياراتِ الخارجة (قانون حفظ الشحنة)، وحول كل مسار مغلقة تساوي مجموع القوى الدافعة الكهربية ومجموعَ انخفاضات فرق الجهد IR (قانون حفظ الطاقة). وإسناد اتجاه لكل تيار وكتابة معادلة وصلة واحدة ومعادلة مسار واحدة لكل مسار مستقل يعطي معادلات آنية كافية لإيجاد كل تيار — والجواب السالب يعكس ببساطة السهم المفترض.

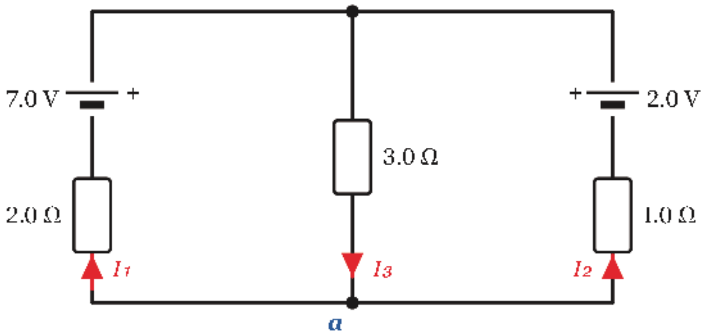
تمرين:

١. تتكون دائرة من بطارية ومقاومات كما في الشكل 3-2-9. أوجد اتجاه ومقدار التيار المار خلال كل مقاومة.



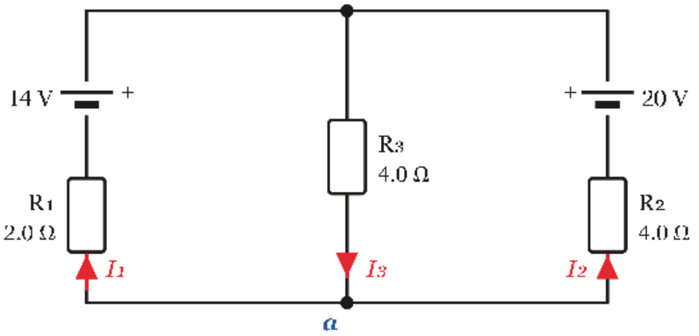
شكل 3-2-9 تمرين 1: بطاريتان 54 V و 42 V مع مقاومات 30 Ω و 5.0 Ω و 10 Ω في شبكة ذات حلقتين

٢. تتكون دائرة من بطارية ومقاومات كما في الشكل 3-2-10. أوجد اتجاه ومقدار التيار المار خلال كل مقاومة.


7.0 V
+
2.0 Ω
3.0 Ω
+
2.0 V
1.0 Ω
I_1
I_3
I_2
a

شكل 3-2-10 تمرين 2: بطاريتان V 7.0 و V 2.0 مع مقاومات Ω 2.0 و Ω 3.0 و Ω 1.0 في شبكة ذات حلقتين.

٣. تتكون دائرة من بطارية ومقاومات R_1 إلى R_3 كما في الشكل 3-2-11. أوجد اتجاه ومقدار التيار المار خلال كل مقاومة.


14 V
+
R_1
2.0 Ω
R_3
4.0 Ω
+
20 V
R_2
4.0 Ω
I_1
I_3
I_2
a

شكل 3-2-11 تمرين 3: بطاريتان V 14 و V 20 مع $R_1 = 2.0\ \Omega$، $R_2 = 4.0\ \Omega$، و$R_3 = 4.0\ \Omega$ في شبكة ذات حلقتين.

الفصل الرابع

المغناطيسية والحث الكهرومغناطيسي

٤-١ — المجال المغناطيسي الناتج عن تيار كهربي

٤-٢ — القوة المؤثرة على تيار كهربي بواسطة مجال مغناطيسي

٤-٣ — حركة الجسيمات المشحونة في مجال مغناطيسي

٤-٤ — الحث الكهرومغناطيسي

٤-٥ — الحث الذاتي

الدرس ٤-١ — المجال المغناطيسي الناتج عن تيار كهربي

؟ سؤال الدرس:
ما مدى قوة المجال المغناطيسي الذي ينشئه التيار الكهربائي؟ وما العوامل التي تحدد مقداره؟

ستتعلم

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تحسب** شدة المجال المغناطيسي H بوحدة A/m عند مسافة r من سلك طويل مستقيم يمر به تيار، باستخدام: $H = \frac{1}{2\pi r}$

٢. **تحسب** شدة المجال المغناطيسي عند مركز دائرة يمر بها تيار باستخدام: $H = \frac{1}{2r}$ ثم تضرب الناتج في عدد اللفات N عندما تكون الدائرة ملفًا

٣. **تحدد** شدة المجال المغناطيسي داخل ملف لولبي (Solenoid) من عدد اللفات لكل متر، باستخدام: H=nI.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر

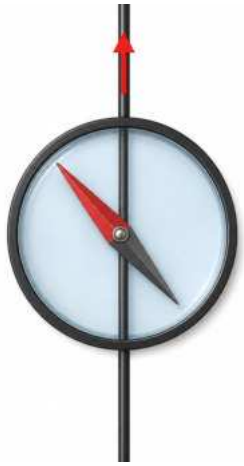
ضع بوصلة مغناطيسية بشكل أفقي واترك إبرتها تستقر في اتجاه الشمال-الجنوب. ثم مرّر سلكًا مستقيمًا فوق الإبرة، بحيث يكون اتجاه السلك ثابتًا، وشغّل التيار الكهربائي.

ستلاحظ أن إبرة البوصلة تنحرف عن اتجاهها.

أوقف التيار، فستعود الإبرة إلى اتجاهها الأصلي. ثم اعكس اتجاه التيار، وستنحرف الإبرة في الاتجاه المعاكس.

هذا يدل على أن الشحنات المتحركة في السلك تولّد مجالًا مغناطيسيًا حول السلك.

فكرة أساسية:
حول السلك الذي يمر به تيار كهربائي، يتكوّن مجال مغناطيسي، وتُقاس شدة هذا المجال H بوحدة الأمبير لكل متر (A/m). إلى أي مدى يمتد هذا المجال؟ وما اتجاهه؟ يمكن أن تساعدك البوصلة في تحديد ذلك.



شكل (1.1.4)

سلك مستقيم يمر به تيار كهربائي موضوع فوق بوصلة. أثناء مرور التيار I، تنحرف إبرة البوصلة عن اتجاه الشمال-الجنوب.

تنبأ

(أ) إذا ضاعفت شدة التيار المار في السلك، فهل تزداد زاوية انحراف إبرة البوصلة، أم تقل، أم تظل كما هي؟

(ب) إذا أبعدت البوصلة مسافة أكبر عن السلك، فهل تزداد شدة المجال المغناطيسي الذي تتعرض له، أم تقل، أم تظل كما هي؟

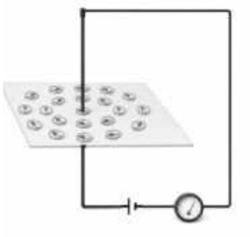
استكشف — دائرة بوصلة أورستد

ما الذي ستفعله: اقرأ كيف تدور إبرة البوصلة بالقرب من سلك مستقيم يمر به تيار كهربائي، بينما تغيّر شدة التيار والمسافة، لتكتشف أن المجال المغناطيسي يتناسب عكسيًا مع المسافة r.

الزمن: 15 دقيقة

الأدوات المطلوبة:

- بطاقة صلبة يمر خلالها سلك رأسي.
- عدة بوصِلات صغيرة لتحديد اتجاه المجال المغناطيسي.
- مسطرة لقياس المسافة r، ومنقلة لقياس زاوية الانحراف θ.
- أميتر لقياس شدة التيار I.
- خلية جافة، مع مقاومة متغيرة للتحكم في شدة التيار.



شكل (2.1.4)

سلك رأسي يمر خلال بطاقة، حيث تصطف البوصلات الصغيرة على دوائر حول السلك لتحديد شكل المجال المغناطيسي، بينما يقرأ الأميتر شدة التيار I.

بطارية جافة (خلية)

أميتر (لقياس التيار)

بوصلة صغيرة (عدة بوصلات)

كرتونة صلبة + سلك رأسي

شكل (2.3.4)

الخطوات:

١ ثبّت السلك رأسيًا بحيث يمر خلال البطاقة، ثم وزّع البوصلات الصغيرة حول السلك، واتركها تستقر في اتجاه الشمال–الجنوب قبل مرور التيار.

٢ شغّل تيارًا معلوم الشدة I واقرأ قيمته من الأميتر. ثم اختر إحدى البوصلات الموجودة على مسافة r من السلك، وسجّل مقدار زاوية انحراف إبرتها θ.

٣ زِد شدة التيار I على خطوات مع تثبيت المسافة r، ثم ثبّت شدة التيار I وغيّر المسافة r تدريجيًا، مع قراءة انحراف البوصلات.

٤ (اختياري) اعكس اتجاه التيار، ولاحظ أن كل إبرة بوصلة تنحرف في الاتجاه المعاكس.

المحاولة	شدة التيار I.(A)	المسافة r(m)	زاوية الانحراف θ°	$\frac{1}{r}$ (A/m)
1				
2				
3				

ملاحظة عملية:

زاوية الانحراف θ المقاسة من اتجاه الشمال تعتمد على المجال المغناطيسي للأرض، لذلك يجب قياسها دائمًا بالنسبة إلى خط الشمال نفسه. حافظ على الحديد وأي مغناطيسات أخرى بعيدًا عن البوصلة حتى يكون المجال الناتج عن السلك هو المؤثر الأساسي على الإبرة.

حلّل ما جمعته:

(أ) قارن عمود زاوية الانحراف θ بعمود $\frac{1}{r}$. عندما تزداد قيمة $\frac{1}{r}$ هل تزداد زاوية الانحراف أيضًا؟ ما العلاقة الوحيدة بين شدة التيار والمسافة التي يبدو أن المجال المغناطيسي يتبعها؟

(ب) قانون المجال المغناطيسي حول سلك مستقيم هو: $H = \frac{1}{2r}$

توقّع من هذا القانون: للحصول على نفس زاوية الانحراف، هل تؤدي مضاعفة شدة التيار I ومضاعفة المسافة r في الوقت نفسه إلى إلغاء تأثير كل منهما؟ هل تتفق نتائج تجاربك مع هذا التوقع؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج: التيار الكهربائي يُنشئ مجالًا مغناطيسيًا حوله

لقد أعطتكم البوصلات الإجابة قبل استخدام أي معادلة. فعندما كانت الدائرة مفتوحة، كانت كل إبرة تتجه نحو الشمال. وعند غلق الدائرة وتشغيل التيار، انحرفت جميع الإبر؛ وهذا يدل على أن التيار الكهربائي، وليس أي مغناطيس آخر، هو الذي ينشئ المجال المغناطيسي حول السلك. لم تتجه الإبر نحو السلك أو بعيدًا عنه، بل استقرت على دوائر تحيط بالسلك؛ ولذلك يُقال إن المجال المغناطيسي يدور حول التيار بدلًا من أن يمتد خارجًا منه. وعند عكس اتجاه التيار، تنحرف كل إبرة في الاتجاه المعاكس؛ أي إن اتجاه دوران المجال المغناطيسي يتحدد باتجاه التيار، وهذا ما يوضحه قاعدة قبضة اليد اليمنى.

زاوية الانحراف لا تعطي قيمة عددية مباشرة لشدة المجال، وإنما تسمح بالمقارنة. وقد ظلت هذه المقارنة صحيحة في جميع التجارب: تزداد زاوية انحراف الإبرة عند زيادة شدة التيار I، وتقل عند زيادة المسافة r عن السلك. لذلك تعتمد شدة المجال على الكمية: $\frac{1}{r}$

وبالتالي، فإن التيار مقسومًا على المسافة هو الكمية التي يحدد بها النموذج شدة المجال المغناطيسي H، وتكون وحدتها الأمبير لكل متر (A/m). أما العامل الذي يحدد القيمة العددية الدقيقة لشدة المجال، فيعتمد على شكل السلك الذي يمر به التيار.

ثلاثة أشكال هندسية أساسية:

يمكن ثني السلك بثلاثة أشكال مختلفة، ويُظهر قانون المجال الأساسي ثلاث صور مختلفة للمجال المغناطيسي.

السلك المستقيم:

عندما يكون السلك مستقيمًا، ينتشر المجال المغناطيسي بالتساوي حوله في صورة دوائر متحدة المركز، ويزداد نصف قطر هذه الدوائر كلما ابتعدنا عن السلك. لذلك يتوزع التيار على محيط دائرة أكبر، وتقل شدة المجال المغناطيسي بزيادة المسافة عن السلك. وهذا يفسر وجود 2π في المقام.

السلك في صورة حلقة دائرية:

عند ثني السلك ليصبح حلقة دائرية، تتجه مساهمات المجال الناتجة عن أجزاء السلك المختلفة نحو مركز الحلقة. عند المركز، تضاف هذه المساهمات معًا، ولذلك تكون شدة المجال عند مركز الحلقة أكبر من شدة المجال الناتج عن سلك مستقيم على مسافة تساوي نصف قطر الحلقة.

وتكون شدة المجال عند مركز الحلقة: $H = \frac{I}{2r}$

وعند استخدام N لفات متطابقة، تتجمع مساهمات جميع اللفات: $H = \frac{NI}{2r}$

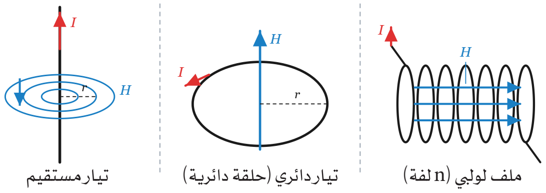
الملف اللولبي (Solenoid):

عند لف السلك حول أسطوانة طويلة بحيث تتجاور اللفات وتتداخل تأثيراتها، يصبح المجال المغناطيسي داخل الملف قويًا ومتقاربًا في المقدار على امتداد محوره.

وتعتمد شدة المجال داخل الملف على عدد اللفات لكل وحدة طول n وعلى شدة التيار I:

$H=nI$

ومن الملاحظ أن قطر الملف لا يظهر في هذه العلاقة.



شكل (3.1.4)

ثلاثة أشكال للمجال المغناطيسي: المجال المغناطيسي يحيط بالتيار المستقيم، ويمر خلال مركز التيار الدائري، ويكون منتظمًا داخل الملف اللولبي.

مصطلح:

مقدار شدة المجال المغناطيسي الناتج عن 1 أمبير في سلك مستقيم يساوي تقريبًا: 0.16A/m على بُعد متر واحد.

0.16 A/m على بُعد سنتيمتر واحد.

وللحصول على قيم تصل إلى آلاف A/m كما في بعض المغناطيسات الكهربائية، لا نحتاج إلى زيادة التيار بدرجة كبيرة، بل يمكن لف مئات اللفات لكل متر.

حقيقة أساسية:

Solenoid — الملف اللولبي

اعتبار المجال المغناطيسي داخل الملف منتظمًا هو نموذج تقريبي، ويكون هذا التقريب جيدًا فقط داخل أسطوانة يكون طولها أكبر بكثير من قطرها.

عند الاقتراب من طرفي الملف، يقل تداخل تأثيرات اللفات، لذلك تصبح شدة المجال هناك أضعف من القيمة التي تتنبأ بها المعادلة، ويمتد المجال إلى الخارج بدلًا من أن يظل محصورًا في اتجاه مستقيم.

نقطة

المجال المغناطيسي الناتج عن تيار مستقيم.

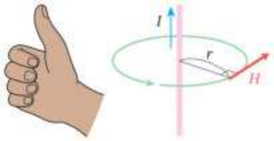
ليكن:

- H شدة المجال المغناطيسي بوحدة A/m.
- I شدة التيار بوحدة A.
- r المسافة من السلك الذى يمر فيه التيار بوحدة m.

للحلقة الدائرية الواحدة: $H = \frac{1}{2\pi r}$

قاعدة قبضة اليد اليمنى:

وجّه إبهام اليد اليمنى في اتجاه التيار I، فتشير الأصابع الملتفة حول السلك إلى اتجاه المجال المغناطيسي H



شكل (4.1.4)

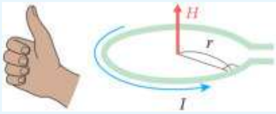
أمسك السلك بحيث يشير إبهامك في اتجاه التيار I، وتلتف أصابعك في اتجاه المجال المغناطيسي H حول السلك.

شدة المجال المغناطيسي عند مركز تيار دائري.

ليكن:

- H شدة المجال المغناطيسي بوحدة A/m.
- I شدة التيار بوحدة A.
- r نصف قطر الحلقة الدائرية بوحدة m. $H = \frac{1}{2r}$

المعنى: عند مركز الحلقة، يكون اتجاه المجال المغناطيسى H على طول محور الحلقة، بينما يسرى التيار I فى مسار الحلقة.



شكل (5.1.4)

عند مركز حلقة نصف قطرها r، يشير المجال المغناطيسي H على طول محور الحلقة، بينما يسري التيار I حول الحلقة.

شدة المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي (Solenoid)

الملف اللولبي هو ملف أسطواني مكوَّن من سلك موصل ملفوف بإحكام في صورة لفات متقاربة.

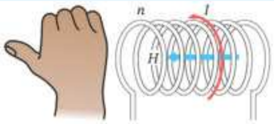
ليكن:

- H شدة المجال المغناطيسي بوحدة A/m.
- I شدة التيار بوحدة A.
- n عدد اللفات لكل متر، ووحدته m^{-1}.

إذن: H=nI

قاعدة اليد اليمنى:

لف أصابع اليد اليمنى في اتجاه سريان التيار في لفات الملف، فيشير الإبهام إلى اتجاه المجال المغناطيسى H على طول محور الملف.



شكل (6.1.4)

لف أصابعك في اتجاه سريان التيار I في لفات الملف، فيشير إبهامك إلى اتجاه المجال المغناطيسي H على طول محور الملف

صندوق المعادلات:

تيار مستقيم:	$H = \frac{1}{2\pi r}$
تيار دائرى عند المركز:	$H = \frac{1}{2r}$
ملف دائرى عدد لفاته N:	$H = \frac{NI}{2r}$
ملف لولبى:	H=nI

حيث: $H = \frac{N}{L}$

أي أن n هو عدد اللفات لكل متر، وN عدد اللفات الكلي، وL طول المل

مثال محلول:

الموقف:	حدد قيمة كل إجابة مقربةً إلى رقمين عشريين، بافتراض أن $\pi = 3.14$. (أ) حدد شدة المجال المغناطيسي (بوحدة A/m) –عند نقطة تبعد مسافة 1.0 متر عن سلك مستقيم يمر به تيار شدته 6.0 أمبير. (ب) عند مرور تيار شدته 0.30 أمبير في ملف دائري مكون من 5 لفات ونصف قطره 0.20 متر، حدد شدة المجال المغناطيسي (بوحدة A/m) عند مركز الدائرة. (ج) عند مرور تيار شدته 2.0 أمبير في ملف لولبي (سولينويد) طوله 0.50 متر ومكون من 300 لفة، حدد شدة المجال المغناطيسي (بوحدة A/m) المتولد داخله.
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات والمطلوب:** (أ) $I = 6.0\ A$، $r = 1.0\ m$؛ أوجد H. (ب) $I = 0.30\ A$، $N = 5$، $r = 0.20\ m$؛ أوجد H عند المركز. (ج) $I = 2.0\ A$، الطول L $L = 0.50\ m$، $N = 300$ لفة؛ أوجد H في الداخل
التمثيل:	انظر الشكل 3–1–4: استخدم لوحة السلك المستقيم للحالة (a)، ولوحة الحلقة الدائرية للحالة (b)، ولوحة الملف اللولبي للحالة (c).
الاستراتيجية:	اختر الصيغة الرياضية التي تناسب كل شكل هندسي — تيار مستقيم $H = I/(2\pi r)$، تيار دائري $H = I/(2r)$، ملف لولبي $H = nI$ — ثم عوّض بقيم التيار أو المسافة أو عدد اللفات لتحديد شدة المجال المغناطيسي. بالنسبة للملف العادي، اضرب ناتج اللفة الواحدة في N؛ أما بالنسبة للملف اللولبي، فاحسب أولاً قيمة $n = N/L$
الحل الموضح:	(أ) تيار مستقيم، $H = I/(2\pi r)$: $H = 6.0/(2 \times 3.14 \times 1.0) = 6.0/6.28 = 0.955\ldots \approx 0.96\ A/m$ (ب) في ملف دائري مكون من N لفة، تكون شدة المجال مساوية لـ N ضعف شدة مجال تيار دائري ذي لفة واحدة، $H = NI/(2r)$: $H = 0.30/(2 \times 0.20) \times 5 = 0.75 \times 5 = 3.75 \approx 3.8\ A/m$ (ج) ملف لولبي (سولينويد)، $H = nI$ حيث $n = N/L = 300/0.50$: $H = (300/0.50) \times 2.0 = 600 \times 2.0 = 1.2\times10^3\ A/m$
منطقية الحل:	(أ) تؤدي قسمة بضعة أمبيرات على 6 تقريباً إلى الحصول على مجال يقارب 1 أمبير/متر، وهي قيمة مناسبة لسلك يبعد مسافة متر واحد. (ب) تضيف كل لفة 0.75 أمبير/متر، وتنتج خمس لفات مجالاً بقيمة بضعة أمبيرات/متر. (ج) يعمل الملف المكدس بإحكام –بمعدل 600 لفة لكل متر– على تركيز المجال، لذا يُتوقع الحصول على قيمة تبلغ آلاف الأمبيرات/متر.
فسِّرها بنفسك:	بيِّن في جملة واحدة سبب توليد الملف الدائري مجالاً أقوى عند مركزه مقارنةً بحلقة مفردة يمر فيها التيار نفسه.

جرِّب بنفسك: حدد شدة المجال المغناطيسي H بوحدة A/m عند نقطة تبعد 2.0 m عن سلك مستقيم يمر به تيار شدته 8.0 A، مع اعتبار: pi = 3.14 والإجابة إلى رقمين عشريين.

حاول:

١. احسب ما يلي مقرباً الناتج إلى رقمين معنويين، بافتراض أن $\pi = 3.14$: حدد شدة المجال المغناطيسي (بوحدة A/m) عند نقطة تبعد مسافة 0.50 m عن سلك مستقيم يمر به تيار شدته 4.0 A.

٢. عند مرور تيار شدته 0.72 A في ملف دائري مكون من 20 لفة ونصف قطره 0.15 m، احسب شدة المجال المغناطيسي عند مركز الدائرة (بوحدة A/m).

٣. عند مرور تيار شدته 1.5×10^{-2} A في ملف لولبي طوله 0.20 m ومكون من 200 لفة، احسب شدة المجال المغناطيسي المتولد داخله (بوحدة A/m).

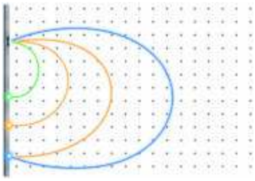
شكل (7.1.4)

مغناطيس كهربائي لرفع الخردة
مغناطيس كهربائي يُستخدم في ساحة للخردة لرفع المعادن؛ وهو عبارة عن ملف يحتوي على عدد كبير من اللفات النحاسية ملفوفة حول قلب من الحديد، ويتصل الملف بكابل طاقة معزول. يستطيع المغناطيس الكهربائي الإمساك بكمية كبيرة من خردة الحديد والصلب الموجودة أسفل سطحه المسطح ورفعها ضد تأثير الجاذبية. ولا تظل ملتصقة به إلا المواد الفيرومغناطيسية، وتكون أكثر كثافة بالقرب من سطح المغناطيس.

في سياق جديد

ملفًا لولبيًا، ثم ضع قلبًا من الحديد بداخله، وشغّل التيار الكهربائي؛ سيتحول الملف إلى مغناطيس كهربائي يمكن تشغيل مجاله وإيقافه، والتحكم في اتجاهه من خلال اتجاه التيار.
وبما أن المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي يتبع العلاقة: H = nI
فإن زيادة عدد اللفات لكل متر أو زيادة شدة التيار تجعل المجال المغناطيسي أقوى. وهذا هو المبدأ الذي يفسر كيفية عمل المرحلات الكهربائية، وكيف تستطيع رافعات ساحات الخردة الإمساك بالحديد، وكذلك كيفية قيام مكبرات الصوت بتحريك الأغشية الخاصة بها.

جرِّب بنفسك: ملف لولبي طوله 0.40 m، ملفوف حوله 800 لفة، ويمر به تيار شدته 1.5 A.
احسب شدة المجال المغناطيسي داخله بوحدة).


شكل (8.1.4)

الأرض كمغناطيس كهربي عملاق: يُولِّد التيارُ الساري في اللبِّ السائل (المكوَّن من الحديد) والخاضع لعملية الحمل الحراري مجالاً ثنائي القطب، وتصطفُّ البوصلةُ الموجودة على السطح بمحاذاته

طبيعة العلم:

من الأصل — هل الأرض مغناطيس كهربائي ضخم؟

تتصرف الأرض مثل مغناطيس ضخم؛ حيث يتصرف القطب الجغرافي الشمالي كأنه قطب مغناطيسي جنوبي، بينما يتصرف القطب الجغرافي الجنوبي كأنه قطب مغناطيسي شمالي، ويُعرف ذلك باسم المغناطيسية الأرضية (Geomagnetism).

ويُعتقد أن هذا المجال المغناطيسي ينشأ من الحديد السائل ذي درجة الحرارة المرتفعة في مركز الأرض، والذي يتحرك بالحمل الحراري بالتزامن مع دوران الأرض، مما يؤدي إلى توليد تيار كهربائي هائل داخل الأرض.

العلاقة بين التيار الكهربائي والمجال المغناطيسي التي اكتشفها أورستد هي علاقة واحدة يمكن التعبير عنها بعدة صور، بحيث توجد صورة مناسبة لكل هندسة أو شكل للموصل، بدلًا من اعتبارها مجموعة من الحقائق المنفصلة.

مشهد البداية

إن اعتبار المجال المغناطيسي للأرض دليلًا على وجود تيار كهربائي داخلي يوضح كيف يستطيع الفيزيائيون توسيع قانون تم اختباره على سلك في المختبر ليطبّقوه على نظام لا يمكنهم الوصول إليه مباشرة، ثم يختبرون صحة هذا التفسير باستخدام ما يمكنهم قياسه عند سطح الأرض.

دورك الآن: اقترح ملاحظة واحدة عند سطح الأرض يمكن لعالِم استخدامها لاختبار فكرة أن مغناطيسية الكوكب ناتجة عن تيار كهربائي داخلي.

سؤال الدرس، وإجابته:

يحيط بالتيار الكهربائي دائماً مجال مغناطيسي تُقاس شدته (H) بوحدة أمبير/متر(A/m). وتتحدد قيمة هذه الشدة بناءً على مقدار التيار والهندسة الخاصة بالموصل؛ إذ تكون $H = I/(2\pi r)$ عند مسافة r من سلك مستقيم، و$H = I/(2r)$ مضروبة في عدد اللفات N في حالة الملف) عند مركز تيار دائري، و$H = nI$ داخل ملف لولبي ومن ثم، فإن زيادة شدة التيار، أو جعل الهندسة أكثر تقارباً، أو زيادة عدد اللفات لكل متر، تؤدي جميعها إلى زيادة شدة المجال.

تمرين:

١. احسب ما يلي مقرباً النتيجة إلى رقمين معنويين، بافتراض أن $\pi = 3.14$: احسب شدة المجال المغناطيسي (بوحدة A/m) عند نقطة تبعد 0.20 متر عن سلك مستقيم يمر به تيار شدته 3.14 أمبير.

٢. احسب شدة المجال المغناطيسي (بوحدة A/m) عند نقطة تبعد 0.20 متر عن سلك مستقيم يمر به تيار شدته 0.68 أمبير.

٣. عند مرور تيار شدته 0.40 أمبير في سلك موصل دائري نصف قطره 0.10 متر، احسب شدة المجال المغناطيسي عند مركز الدائرة (بوحدة A/m).

٤. عند مرور تيار شدته 0.50 أمبير في ملف دائري مكون من 10 لفات ونصف قطره 0.10 متر، احسب شدة المجال المغناطيسي عند مركز الدائرة (بوحدة A/m).

٥. عند مرور تيار شدته 2.0 أمبير في ملف لولبي (سولينويد) طوله 0.10 متر ومكون من 500 لفة، احسب شدة المجال المغناطيسي المتولد داخله (بوحدة A/m).

٦. عند مرور تيار في ملف لولبي طوله 0.10 متر ومكون من 250 لفة، تولد مجال مغناطيسي شدته 5.0×10^2 A/m داخله. احسب شدة التيار المار (بوحدة الأمبير).

٤-٢ القوة المؤثرة على موصل يمر به تيار موضوع في مجال مغناطيسي

؟ سؤال الدرس:

ما مقدار القوة التي يؤثر بها المجال المغناطيسي على سلك يمر فيه تيار، وما اتجاه هذه القوة؟

ستتعلم أن:

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **احسب** القوة المؤثرة على سلك يمر به تيار وموضوع عمودي على مجال مغناطيسي باستخدام العلاقة $F = \mu IHL$، مع تحديد μ على أنها النفاذية المغناطيسية $[N/A^2]$ للمادة المحيطة.

٢. **استخدم** كثافة الفيض المغناطيسي $B = \mu H\ [T]$ لكتابة القوة بالصيغة $F = IBL$، واستخدم $I \sin\theta$ للتيار الذي يقطع المجال بزاوية معينة: $F = IBL \sin\theta$.

٣. **طبّق** قاعدة اليد اليسرى لفلمنج لتحديد اتجاه القوة المغناطيسية عن طريق معرفة اتجاه كل من التيار الكهربى والمجال المغناطيسي.

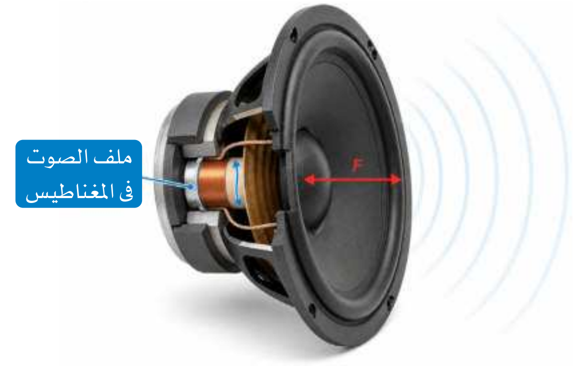
فكرة أساسية

يتأثر سلك طوله L ويمر به تيار I موضوع فى مجال مغناطيسي شدته B (بوحدة تسلا)، بقوة F (بوحدة نيوتن). ما مقدار هذه القوة وما اتجاهها؟

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر

ضع طرف إصبعك برفق على المخروط الورقي لمكبر الصوت أثناء تشغيل الموسيقى؛ ستشعر به وهو يهتز ذهابًا وإيابًا. ففي الداخل، تتدلى لفافة (ملف) من سلك رفيع

معلقة في الفجوة الضيقة لمغناطيس دائم، وهي مثبتة لاصقًا بالجزء الخلفي من المخروط. وعندما يمرر مكبر الصوت تيار الموسيقى ذهابًا وإيابًا عبر الملف ، يقوم المجال المغناطيسي بدفع الملف — ومعها المخروط — إلى الداخل والخارج، فيدفع المخروط المتحرك الهواءَ ليُصدر الصوت. وإذا تم زيادة مستوى الصوت عند نفس النغمة ، تزداد قوة اهتزاز المخروط؛ فالتيار الكهربى المار فى الملف الموجود داخل مجال مغناطيسي يتعرض لقوة مؤثرة.



الشكل 4-2-1 • تتدلى ملف الصوت الخاص بمكبر الصوت داخل المجال المغناطيسي: إذ يؤدي مرور تيار الموسيقى عبر الملف إلى أن المجال يؤثر عليه — وللمخروط المُلصق بها — نحو الداخل والخارج (بقوة F)، وبالتالي فإن التيار الأكبر يولد قوة مؤثرة أكبر.

تنبأ:

(أ) إذا قمت برفع مستوى الصوت بحيث يزداد التيار المار في الملف، فهل تزداد القوة المؤثرة على المخروط، أم تقل، أم تظل كما هي؟

(ب) إذا كان سلك الملف فى مستوى موازى لاتجاه المجال المغناطيسي بدلًا من أن يكون فى وضع عمودى، فهل ستزداد القوة المؤثرة، أم ستقل، أم ستتلاشى؟

استكشف

ما ستفعله: قِس القوة المؤثرة على موصل يمر به تيار كهربي باعتبارها سبب التغير في الوزن على ميزان، ولاحظ كيف تزداد هذه القوة بزيادة التيار.

الزمن: 15 دقيقة.

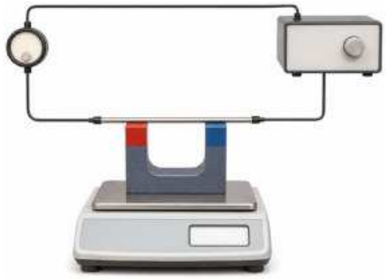
ستحتاج إلى:

قضيب مغناطيسي

ميزان

مصدر تيار مستمر

أميتر



الشكل 4-2-2 • قضيب موصل طوله L ويمر به تيار I، موضوع بين قطبي مغناطيس ومستقر على ميزان حساس؛ حيث يقيس الميزان القوة، ويُستخدم مقياس تيار (أميتر) ومصدر طاقة قابل للضبط لتحديد قيمة التيار I، بينما يُظهر المنظر العلوي القضيب وقد أُدير بزاوية θ بالنسبة للمجال H.

الخطوات:

١ ثبّت المغناطيس بحيث يواجه قطباه (الشمالي والجنوبي) بعضهما البعض عبر فجوة، وضع قضيبًا موصلًا مستقيمًا طوله (L) بحيث يمتد عبر الفجوة ويكون عموديًا على اتجاه المجال المغناطيسي.

٢ ضع المغناطيس على كفة ميزان حساس واضبط القراءة عند الصفر في غياب سريان التيار.

٣ أغلق الدائرة الموصلة بمصدر تيار مستمر وجهاز أميتر، واضبط شدة التيار عند القيمة (I)، ثم اقرأ قيمة القوة (F) من خلال التغير في قراءة الميزان، واحسب النسبة (F/I).

٤ زِد قيمة التيار (I) بمقدار خطوات متساوية وكرر العملية، مع الحرص على إبقاء القضيب في وضع عموديًا على اتجاه المجال المغناطيسي.

★ ملاحظة عملية

يجب ضبط الميزان عند الصفر أثناء إيقاف التيار، بحيث تمثل كل قراءة التغير الناشئ عن التيار وحده؛ إذ يعني التغير في الكتلة (Δm) وجود قوة مقدارها $F = \Delta m \times g$

المحاولة	شدة التيار I (A)	القوة F (mN)	F / I (mN / A)
١			
٢			
٣			

حلّل ما جمعته:

(أ) من العمود المخصص للنسبة F/I: كيف تتغير قيمتها مع تغير التيار (I)؟ وما الذي تدل علية ثبات قيمة F/I عن طبيعة اعتماد القوة (F) على التيار (I)؟

(ب) بالنسبة لهذه الفجوة، تساوي القيمة الثابتة F/I مع المقدار BL. بالاستعانة بطول الموصل L الذي حددته، توقّع مقدار القوة عند قيمة معينة للتيار لم تقم باختبارها، وبيّن كيف سيؤثر استخدام مغناطيس أقوى على هذه القيمة.

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج

المجال المغناطيسي يؤثر بقوة دفع على التيار

تُحدد مرحلة الاستكشاف طبيعة العلاقة؛ فقد ازدادت قوة الدفع تدريجيًّا مع زيادة التيار، وظلت النسبة التي سجلتها في الجدول ثابتة رغم تغير قيمة التيار الكهربي، مما يعني أن القوة تتناسب طرديًا مع شدة التيار (I). وللسبب ذاته، يجب أن يدخل عاملان آخران في معادلة الضرب هذه: فالجزء الأطول من السلك الموجود داخل الفجوة يحتوي -بشكل متناسب- على كمية أكبر من الشحنات المتحركة التي تتعرض للدفع، كما أن المجال الأقوى يدفع كل حامل شحنة بقوة أكبر تتناسب مع شدة المجال. وهذا يحدد القوة باعتبارها حاصل ضرب كل من التيار وشدة المجال وطول السلك المغمور، مع بقاء ثابت واحد يعبر عن تأثير المادة التي تملأ الفجوة، وهو «النفاذية المغناطيسية» (μ)؛ ولهذا السبب تولد الفجوة المملوءة بالحديد قوة دفع أكبر بكثير مقارنة بالفجوة الهوائية عند نفس شدة المجال (H). وعند إزاحة السلك عن الوضع العمودي، لا يطرأ أي تغيير على خصائص المجال، بل يتغير فقط التوزيع الهندسي: أي ذلك الجزء من التيار الذي يسري بمحاذاة خطوط المجال. لا يتعرض لأي دفع على الإطلاق، ولذا فإن المركبة الموازية للمجال (أو الممتدة عبره) هي وحدها التي تبقى، وتتناقص قيمتها وفقًا لدالة الجيب ($\sin \theta$) إلى أن يصبح السلك الممدود بموازاة المجال غير خاضع لأي دفعٍ مهما.

كثافة الفيض المغناطيسي ووحدة التسلا

يُعد التعامل مع الرمزين μ وH بشكل منفصل أمرًا مزعجًا؛ إذ أن التيار نفسه المار في الفجوة ذاتها يولد قوة دفع مختلفة اعتمادًا على المادة الموجودة داخل تلك الفجوة. ولما كان هذان الرمزان يظهران دائمًا معًا كحاصل ضرب، فمن الأجدى دمجهما في كمية واحدة؛ وهذه الكمية المدمجة هي التي تحظى باسم ووحدة قياس خاصين بها. ويؤدي هذا الاستبدال إلى اختصار معادلات القوة لتصبح في صيغة تخلو تمامًا من الرمز μ، مما يحقق فائدة عملية كبيرة: فالكمية المدمجة الناتجة تطابق تمامًا القيمة التي نحصل عليها عند قياس القوة؛ إذ يكفي قياس قوة الدفع المؤثرة على تيار معلوم يمر عبر طول معلوم، ثم إجراء عملية القسمة، لتكشف الفجوة عن قيمتها الخاصة — في حين لا يمكن استنتاج قيمة H إلا بعد معرفة نوع المادة الموجودة في ذلك الحيز. وتُعرَّف وحدة «التسلا» بناءً على عملية القياس هذه تحديدًا، حيث تساوي نيوتنًا واحدًا لكل أمبير-متر.

اتجاه القوة

لا يشير مقدار القوة إلى الاتجاه الذي سيتحرك فيه السلك، بل يجب تحديد ذلك بشكل منفصل. وما تؤكده الهندسة الفعلية للوضع هو أن الاتجاهات الثلاثة — التيار والمجال وقوة الدفع — متعامدة فيما بينها؛ ولذا فإن قوة الدفع تتجه دائمًا خارجةً من المستوى الذي يحدده الاتجاهان الآخران. وتُعد قاعدة «فليمنغ» ببساطة وسيلةً لتجسيد هذه الحقيقة باستخدام اليد؛ إذ يمثل بسط ثلاثة أصابع من اليد اليسرى بزوايا قائمة هذا الترتيب، وتتيح قراءة وضعية الأصابع الإجابة عن السؤال دون الحاجة إلى إعادة الرسم. وينتج عن ذلك أمران مباشران: إذا عكستَ اتجاه التيار أو بدّلتَ القطبين، ينعكس اتجاه قوة الدفع، أما إذا عكستَ كليهما معًا، فلا يتغير اتجاهها. ونظرًا لأن قوة الدفع غالبًا ما تتجه عموديًا نحو الخارج من الصفحة أو نحو الداخل فيها، فإن هذا الدرس يعتمد على رمزي العمق (النقطة) أكثر بكثير من اعتماده على أي سهم.

حقيقة أساسية

القياس:

تيارٌ شدته أمبير واحد يسري في سلك طوله متر واحد موضوع داخل مجال مغناطيسي شدته تسلا واحدة، يتعرض لقوة دفع مقدارها نيوتن واحد — أي ما يعادل تقريبًا وزن تفاحة صغيرة. أما مغناطيسات المختبر فلا تولّد سوى بضعة أجزاء من المئة من التسلا، ولهذا السبب فإن قوى الدفع التي تقيسها في المختبر تكون بمقياس المللي نيوتن.

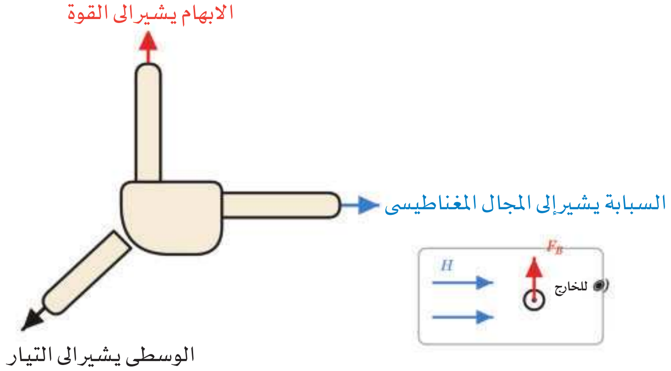
مصطلح

النفاذية المغناطيسية:

إن التعامل مع μ بوصفها قيمة ثابتة واحدة هو ما يحافظ على بساطة النموذج، وهو افتراض آمن عند التعامل مع الهواء أو الأوساط العادية غير المغناطيسية. غير أن الحديد والمواد المغناطيسية الحديدية الأخرى تخالف هذه القاعدة؛ إذ تعتمد نفاذيتها ذاتها على المجال المغناطيسي المُطبَّق عليها، وتنهار هذه النفاذية بمجرد وصول المادة إلى حالة التشبع، مما يؤدي إلى زوال العلاقة الخطية المباشرة بين H وB.

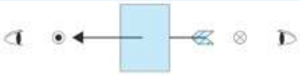
ملحوظة

نستخدم هنا قاعدة اليد اليسرى. توجد نسخة أخرى خاصة باليد اليمنى، لكنها تجيب عن سؤال مختلف - يتعلق باتجاه التيار المستحث، وهو موضوع سنتناوله بعد درسين - واستخدام اليد الخطأ يؤدي إلى عكس الإجابة تمامًا. لاحظ أيضًا أن هذه القاعدة تحدد الاتجاه فقط؛ إذ يجب أخذ عامل ($\sin \theta$) في الاعتبار عند حساب المقدار.



الشكل 4-2-3 • قاعدة اليد اليسرى لفليمنغ: عند وضع الإبهام والسبابة والإصبع الوسطى بحيث تشكل زوايا قائمة فيما بينها، تشير الإصبع الوسطى إلى اتجاه التيار (I)، وتشير السبابة إلى اتجاه المجال المغناطيسي (H)، بينما يحدد الإبهام اتجاه القوة (F)؛ كما هو موضح في الشكل الفرعي الذي يظهر قضيبًا يمر فيه تيار خارجًا من مستوى الصفحة عبر مجال مغناطيسي يتجه نحو اليمين.

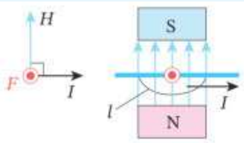
نقطة

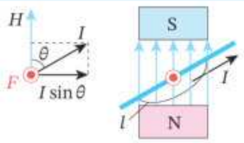


! الرموز التي تمثل الاتجاه العمودي على الصفحة

يُرمز للاتجاه الخارج من الصفحة بـ (◉)،

ويُرمز للاتجاه الداخل إلى الصفحة بـ (⊗).





! لنفترض أن مقدار القوة المؤثرة على التيار بواسطة المجال المغناطيسي هو F [نيوتن]، والتيار هو I [أمبير]، وشدة المجال المغناطيسي هي H [أمبير/متر]، وطول السلك الموصل في المجال المغناطيسي هو l [متر]،

- عندما يتقاطع التيار والمجال المغناطيسي عموديًّا $F = \mu IHl$ يُسمى μ النفاذية المغناطيسية [نيوتن/أمبير^2]، ويتم تحديده بواسطة نوع المادة المحيطة.
- عندما لا يكون التيار والمجال المغناطيسي متعامدين: تُستخدم المركبة العمودية على المجال المغناطيسي من قيمة التيار، وهي $(I \sin \theta)$.

! تُسمى الكمية التي تعبر عن حالة المجال المغناطيسي - بما في ذلك تأثير المواد المحيطة - «كثافة الفيض المغناطيسي»، وتُعرف بالمعادلة: $B = \mu H$.

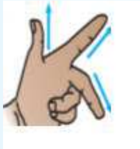
وحدة قياس كثافة الفيض المغناطيسي المستخدمة هي «التسلا» (ورمزها T).

! للتعبير عن مقدار القوة F [نيوتن] التي يؤثر بها المجال المغناطيسي على التيار باستخدام كثافة الفيض المغناطيسي B [تسلا]:

عندما يتقاطع التيار والمجال المغناطيسي بشكل متعامد:

$$F = IBl$$

عندما يتقاطع التيار والمجال المغناطيسي بشكل مائل: $F = IBl \sin \theta$



! قاعدة اليد اليسرى لفليمنغ

اتجاه الإصبع الأوسط ← اتجاه التيار

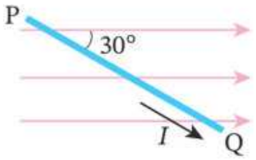
اتجاه إصبع السبابة ← اتجاه المجال المغناطيسي

اتجاه الإبهام ← اتجاه القوة

صندوق المعادلات:

القوة (شدة المجال **H**)	$F = \mu IHl$ عندما يكون التيار عموديًا على المجال.
كثافة الفيض المغناطيسي	$B = \mu H$، ووحدة B هي التسلا T.
قوة (كثافة الفيض **B**)	$F = IBl$ عندما يكون التيار عموديًا على المجال. $F = IBl\sin\theta$ عندما يصنع التيار زاوية θ مع المجال

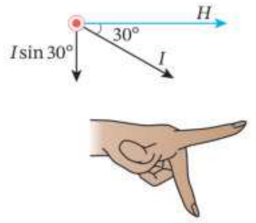
مثال محلول:



الشكل 4-2-4

مثال محلول: يقع القضيب PQ بزاوية 30 درجة بالنسبة لمجال مغناطيسي يتجه نحو اليمين، ويمر فيه تيار I من النقطة P إلى النقطة Q.

الموقف:	وُضع قضيب موصل PQ طوله 0.10 متر في مجال مغناطيسي منتظم شدته 50 أمبير/متر (A/m) ومُتجه نحو اليمين، بحيث يميل بزاوية قدرها 30 درجة بالنسبة للمجال المغناطيسي، وسرى فيه تيار كهربائي شدته 1.2 أمبير في الاتجاه من P إلى Q. حدد اتجاه ومقدار القوة F (بوحدة نيوتن) التي يؤثر بها المجال المغناطيسي على القضيب الموصل PQ، مقربًا النتيجة إلى رقمين عشريين. افترض أن النفاذية المغناطيسية تساوي 1.26×10^{-6} نيوتن/أمبير^2 (N/A^2).
المعطيات والمطلوب:	$I = 1.2\ A\ , H = 50\ A/m\ , l = 0.10\ m\ , \theta = 30°, \mu = 1.26 \times 10^{-6}\ N/A^2$ أوجد اتجاه القوة F ومقدارها مقرّبًا النتيجة إلى رقمين عشريين.
التمثيل:	انظر الشكل 4-2-5: يحمل القضيب PQ تيارًا مقداره I يميل بزاوية 30 درجة على مجال أفقي H؛ وتكون مركبة التيار المارّة عبر المجال هي $I\sin 30°$.
الاستراتيجية:	حدد اتجاه القوة باستخدام قاعدة اليد اليسرى لفليمنغ (الإصبع الأوسط ← التيار، السبابة ← المجال، الإبهام ← القوة). ثم أوجد المقدار: حيث يتقاطع التيار مع المجال بزاوية، لذا استخدم المركبة العمودية $I\sin\theta$ في المعادلة $F = \mu IHl\sin\theta$.
الحل الموضح:	**الاتجاه:** وفقًا لقاعدة اليد اليسرى لفليمنغ، تكون القوة عمودية على الصفحة ومتجهةً إلى الخارج منها (◉). **المقدار:** يصنع التيار زاوية قدرها 30 درجة مع المجال، لذا نستخدم العلاقة: $F = \mu IHl\sin\theta$ $F = (1.26 \times 10^{-6}) \times 1.2 \times \sin 30° \times 50 \times 0.10$ $= (1.26 \times 10^{-6}) \times 1.2 \times 0.50 \times 50 \times 0.10 = 3.78 \times 10^{-6} \approx 3.8 \times 10^{-6}\ N$
منطقية الحل:	تجعل النفاذية المغناطيسية التي تبلغ حوالي 10^{-6} القوةَ صغيرةً جدًا، كما أن العوامل ذات الرتبة 1 (للتيار) و0.1 (للطول) تُبقي قيمتها في حدود بضعة أضعاف 10^{-6} نيوتن؛ وهو مقدار مناسب لسلك تجارب موضوع في مجال مغناطيسي ضعيف. ونظرًا لأن الزاوية تبلغ 30 درجة فقط، فإن المعامل $(\sin\theta = 0.50)$ يؤدي إلى خفض القوة إلى النصف مقارنةً بما سيختبره تيار متعامد مع المجال.
فسِّرها بنفسك:	اذكر في جملة واحدة سبب كون القوة هي الأكبر إذا أُدير القضيب ليصبح عموديًا على المجال بدلًا من وضعه بزاوية 30 درجة.



الشكل 4-2-5

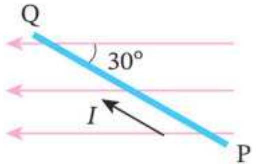
مثال محلول: يقطع التيار I المجال H بزاوية 30 درجة، ولذا فإن المركبة العمودية I sin 30° هي فقط التي تولّد القوة؛ وتُظهر اليدُ قاعدة اليد اليسرى لفليمنغ.

حان دورك الآن: وُضع قضيب موصل طوله 0.10 متر في مجال مغناطيسي منتظم شدته 40 أمبير/متر بحيث يميل بزاوية 30 درجة على اتجاه المجال، وسرى فيه تيار كهربائي شدته 2.0 أمبير. احسب مقدار القوة مقربًا النتيجة إلى رقمين معنويين (علمًا بأن $\mu = 1.26\times10^{-6}$ نيوتن/أمبير^2).

حاول:

١. حدد القيم التالية مقربةً إلى رقمين معنويين: سلك موصل ممدود بشكل عمودي على مجال مغناطيسي منتظم شدته $20\ \mathrm{A/m}$، ويمر فيه تيار كهربائي مقداره $4.0\ \mathrm{A}$. احسب مقدار القوة (بوحدة نيوتن) المؤثرة على جزء من السلك الموصل طوله $0.10\ \mathrm{m}$. افترض أن النفاذية المغناطيسية تساوي $1.26\times10^{-6}\ \mathrm{N/A^2}$.

٢. كما هو موضح في الشكل، وُضع قضيب موصل PQ طوله $0.10\ \mathrm{m}$ في مجال مغناطيسي منتظم كثافة فيضه المغناطيسي $2.0\times10^{-6}\ \mathrm{T}$ ومتجه نحو اليسار، بحيث يميل بزاوية $30°$ على اتجاه المجال المغناطيسي، ويمر فيه تيار مقداره $1.2\ \mathrm{A}$ في الاتجاه من P إلى Q. حدد اتجاه ومقدار القوة F (بوحدة نيوتن) التي يؤثر بها المجال المغناطيسي على القضيب الموصل PQ.



الشكل 4-2-6
تجربة: يمر تيار I في الموصل المستقيم PQ عبر مجال منتظم تتجه خطوطه نحو اليسار، بحيث يقطعها بزاوية $30°$

في سياق جديد

تدور المحركات الموجودة في المراوح الكهربائية والمركبات الكهربائية والعديد من الآلات الأخرى مستخدمةً هذه القوة تحديدًا؛ إذ يمر تيار كهربائي عبر ملف موضوع بين قطبي مغناطيس، فيؤثر المجال المغناطيسي بقوة دفع على جانبي الملف في اتجاهين متعاكسين، مما يؤدي إلى دوران الملف بفعل هاتين القوتين. وعندما يتجاوز الملف الوضع الرأسي أثناء دورانه، ينعكس اتجاه التيار المار فيه، بحيث تعمل قوة الدفع دائمًا على استمرار دورانه في الاتجاه نفسه. إن الدوران المنتظم الناتج عن المجال المغناطيسي ما هو إلا تطبيق متكرر للقوة $(F = IBl)$ على حلقة الملف.

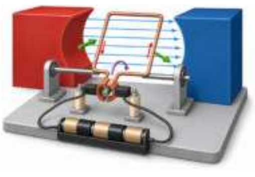
دورك الآن: يقع أحد جانبي ملف محرك بطول 0.050 متر بشكل عمودي على مجال مغناطيسي كثافة فيضه 0.20 تسلا (T)، ويمر به تيار شدته 3.0 أمبير (A). احسب مقدار القوة المؤثرة على هذا الجانب من الملف بوحدة النيوتن (N).

طبيعة العلم:

من المصدر الأصلي — تعريف الكمية الفيزيائية من خلال القوة التي تولدها. لا تُقرأ قيمة كثافة الفيض المغناطيسي (B) مباشرةً من جهاز قياس، بل تُعرَّف من خلال العلاقة $F = IBl$. إذ يقوم الفيزيائيون بتمرير تيار معلوم الشدة (I) في سلك ذي طول معلوم (l) موضوع بشكل عمودي على المجال، ثم يقيسون القوة (F) ويحسبون قيمة B باستخدام المعادلة $B = F/(Il)$. وبناءً على ذلك، يُعرَّف «التسلا» بأنه شدة المجال الذي يولد قوة مقدارها نيوتن واحد (1 N) على سلك طوله متر واحد (1 m) يمر فيه تيار شدته أمبير واحد (1 A). يُعد هذا تعريفًا إجرائيًا؛ حيث تتحدد الكمية الفيزيائية بناءً على عملية القياس التي تنتجها، وليس بناءً على تصور لماهية المجال نفسه. فبينما تُبرز الصيغة $B = \mu H$ العلاقة مع المادة المحيطة، تربط الصيغة $F = IBl$ قيمة B بشيء ملموس يمكن قياس وزنه باستخدام الميزان.

لقد أجرى أمبير قياسًا لهذه القوة في غضون أسابيع قليلة من سماعه عن تجربة أورستد والبوصلة عام ١٨٢٠. أما قاعدة فلمنج فقد ظهرت لاحقًا بكثير، وهي مجرد وسيلة مساعدة للتذكر — أي طريقة لاستحضار الترتيب الهندسي في الذهن وليست قانونًا طبيعيًا؛ فالأساس الفيزيائي يكمن في العلاقة المتجهية التي تعبر عنها هذه القاعدة.

دورك الآن: اقترح قياسًا واحدًا يمكنك إجراؤه على سلك يمر به تيار وموضوع بين قطبي مغناطيس، وذلك لتحديد كثافة الفيض المغناطيسي (B) في تلك الفجوة.



الشكل 4-2-7
محرك تيار مستمر بسيط:
(ينسق امام طبيعة العلم)
يتعرض التيار (I) المار في ملف يقع بين القطبين الشمالي (N) والجنوبي (S) لقوى متعاكسة (F = IBl) عند جانبيه، مما يؤدي إلى دوران الملف؛ ويعمل مبدّل التيار على عكس اتجاه التيار عند كل نصف دورة، لضمان استمرار الدوران في الاتجاه نفسه.

ملف الصوت في المغناطيس

المشهد البداية

سؤال الدرس، وإجابته:

يتعرض التيار المار في مجال مغناطيسي لقوة؛ إذ يؤثر المجال بقوة دفع على الشحنة المتحركة، مما يؤدي إلى تحرك السلك.

عندما يكون اتجاه التيار عموديًا على اتجاه المجال، تُحسب القوة بالعلاقة $F = \mu IHl = IBl$، حيث تمثل $B = \mu H$ كثافة الفيض المغناطيسي بوحدة التسلا؛ أما إذا التقيا بزاوية θ، فإن المركبة المؤثرة هي $I \sin \theta$ فقط، وتصبح المعادلة: $F = IBl \sin \theta$. ويُحدد اتجاه هذه القوة باستخدام قاعدة اليد اليسرى لفليمنج. وتزداد القوة بزيادة شدة التيار، أو قوة المجال المغناطيسي، أو طول السلك.

تمرين:

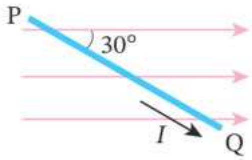
١. حدد القيم التالية بدقة رقمين معنويين. سلك موصل ممدود بشكل عمودي على مجال مغناطيسي منتظم شدته $20\ A/m$، ويمر فيه تيار كهربائي مقداره $1.0\ A$. حدد مقدار القوة المؤثرة على جزء من السلك الموصل طوله $0.20\ m$ بوحدة النيوتن (N). افترض أن النفاذية المغناطيسية تساوي $1.26 \times 10^{-6}\ N/A^2$.

٢. سلك موصل ممدود بشكل عمودي على مجال مغناطيسي منتظم شدته $25\ A/m$، ويمر فيه تيار كهربائي مقداره $2.0\ A$. حدد مقدار القوة المؤثرة على جزء من السلك الموصل طوله $0.10\ m$ بوحدة النيوتن (N). افترض أن النفاذية المغناطيسية تساوي $1.26 \times 10^{-6}\ N/A^2$.

٣. سلك موصل ممدود بشكل عمودي على مجال مغناطيسي منتظم كثافة فيضه المغناطيسي $0.50\ T$، ويمر فيه تيار كهربائي مقداره $4.0\ A$. حدد مقدار القوة المؤثرة على جزء من السلك الموصل طوله $0.20\ m$ بوحدة النيوتن (N).

٤. سلك موصل ممدود بشكل عمودي على مجال مغناطيسي منتظم كثافة فيضه المغناطيسي $2.0 \times 10^{-3}\ T$، ويمر فيه تيار كهربائي مقداره $5.0\ A$. حدد مقدار القوة المؤثرة على جزء من السلك الموصل طوله $2.0\ m$ بوحدة النيوتن (N).

٥. كما هو موضح في الشكل، وُضع قضيب موصل PQ طوله $0.20\ m$ في مجال مغناطيسي منتظم شدته (A/m) وموجه نحو اليمين، بحيث يميل بزاوية قدرها 30 درجة بالنسبة للمجال المغناطيسي، ويمر فيه تيار كهربائي شدته $1.0\ A$ في الاتجاه من P إلى Q. حدد اتجاه ومقدار القوة F (بالنيوتن) التي يؤثر بها المجال المغناطيسي على القضيب الموصل PQ، وافترض أن النفاذية المغناطيسية تساوي $1.26 \times 10^{-6}\ (N/A^2)$.



شكل 8-2-4

التمرين 5: يقع القضيب الموصل PQ بزاوية 30 درجة بالنسبة لمجال مغناطيسي منتظم موجه نحو اليمين، حيث يسري التيار I من P إلى Q.

الدرس ٤-٣ — حركة الجسيمات المشحونة في مجال مغناطيسي

؟ سؤال الدرس:
ما القوة التي يؤثر بها مجال مغناطيسي على شحنة متحركة، وما المسار الذي تسلكه تلك الشحنة عندئذٍ؟

ستتعلم

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تحسب** مقدار قوة لورنتز المؤثرة على شحنة تتحرك عموديًا على مجال مغناطيسي باستخدام $F = qvB$.

٢. **تستخدم** قاعدة فلمنج لليد اليسرى لتحديد اتجاه قوة لورنتز، باعتبار التيار المكافئ في اتجاه حركة الشحنة الموجبة وعكس حركة الشحنة السالبة.

٣. **تساوي** قوة لورنتز بالقوة الجاذبة المركزية $mv^2/r = qvB$، لتجد نصف قطر المسار $r = mv/(qB)$ والزمن الدوري $T = 2\pi m/(qB)$ في المسار الدائري.

فكرة أساسية:
قوة لورنتس f [N] — ما يفعله مجال B بشحنة واحدة q تتحرك بسرعة v. ما مقدارها، وفي أي اتجاه، وأي مسار تفرضه؟

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر

أرسل حزمة إلكترونية رفيعة عبر الفجوة بين قطبَي مغناطيس. ومع إبعاد المغناطيسين، تندفع الحزمة مستقيمة إلى بقعة متوهجة على الشاشة البعيدة. أدِر المجال فتنزاح البقعة جانبًا؛ ومع زيادة المجال تنحني الحزمة إلى قوس أضيق، حتى تلتفّ في دائرة كاملة تعود على نفسها. والإلكترونات الأسرع ترسم دوائر أوسع، والأبطأ أضيق — ومع ذلك لا يلمس الحزمةَ شيءٌ سوى المجال.

شكل (1.3.4)

عند تلاشي المجال تسري الحزمة الإلكترونية مستقيمة إلى الشاشة؛ وبتشغيل مجال متجه إلى داخل الصفحة تلتفّ إلى مسار دائري.

تنبأ

(أ) إذا تم زيادة المجال المغناطيسي، هل يزداد نصف قطر المسار الدائري للإلكترون أم ينقص أم يبقى كما هو؟

(ب) إذا زادت سرعة الإلكترونات، هل يزداد زمن إتمام دورة كاملة (الزمن الدوري) أم ينقص أم يبقى كما هو؟

استكشف — انحناء حزمة إلكترونية في مسار دائري

ما ستفعله: قم بتوجّيه حزمة إلكترونية دقيقة باستخدام مجال مغناطيسي وقس كيف يعتمد نصف قطر مسارها الدائري على سرعة الحزمة وعلى شدة المجال.

الزمن: 20 دقيقة

ما تحتاجه:

- أنبوبة حزمة دقيقة (e/m)
- ملفّا هلمهولتز
- مصدر تيار مستمر
- مسطرة
- فولتميتر لفرق جهد التعجيل وأميتر لتيار الملف

مسطرة
مصدر تيار مستمر
ملفات هلمهولتز
أنبوبة أشعة رقيقة

شكل (2.3.4)

الخطوات:

١ اضبط فرق جهد التعجيل بحيث تغادر الإلكترونات المدفع بسرعة معلومة v، وأدِر ملفَّي هلمهولتز لـ الأنبوب بمجال منتظم B عمودي على الحزمة.

٢ اضبط تيار الملف حتى تنغلق الحزمة المتوهجة في دائرة كاملة؛ اقرأ قطرها 2r على المسطرة واقسمه على اثنين للحصول على نصف القطر r.

٣ ثبّت v وارفع B، معيدًا قراءة r؛ ثم ثبّت B وارفع v، معيدًا قراءة r. وسجّل لكل محاولة v وB وr، واحسب r·B/v.

٤ أخيرًا، قارن النسبة r/v بين تشغيلاتك ذات B الثابتة: إن لم تتغيّر، فزمن الدورة الواحدة، 2πr/v، لا يعتمد على السرعة أيضًا.

ملاحظة عملية:

احصل على السرعة من فرق جهد التعجيل Va باستخدام eVa = ½ mv²، وعلى المجال من تيار الملف باستخدام ثابت B لكل أمبير المطبوع على زوج هلمهولتز. واقرأ قطر الحزمة 2r مباشرة عبر الأنبوبة مقابل المسطرة واقسمه على اثنين؛ وسدِّد نظرك إلى الحافة البعيدة للحلقة المتوهجة عموديًا لتجنّب خطأ الاختلاف المنظوري.

شكل (3.3.4)

أنبوبة حزمة دقيقة (e/m): مدفع إلكتروني يطلق حزمة يثنيها مجال ملف إلى دائرة متوهجة، يُقرأ قطرها 2r على مسطرة عبر الأنبوبة.

المحاولة	السرعة v (m/s)	المجال B (T)	نصف القطر r (m)	r·B/v
1				
2				
3				

حلّل ما جمعته:

(أ) مع تغيير السرعة v والمجال B من محاولة إلى أخرى، ماذا يحدث لقيمة r·B/v في العمود الأخير؟

(ب) تلتفّ الحزمة إلى دائرة مغلقة ومع ذلك لا تتسارع أبدًا — ماذا يقول ذلك عن اتجاه قوة المجال، وكيف يشير ثبات r·B/v إلى العلاقة $r = mv/(qB)$؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

المجال المغناطيسي يدفع الشحنة المتحركة جانبًا لا يلزم افتراض شيء جديد هنا: فالتيار ليس إلا شحنة في عبور، ومن ثمّ فالقوة التي قاسها الدرس السابق على سلك كامل لا بد أن تكون مجموع القوي المؤثرة على حاملات الشحنة المفردة داخله. اقسم قوة السلك تلك على عدد الحاملات التي يحتويها الطول المغمور، يتبقَّ نصيب جسيم واحد. ولا بد أن يزداد مع مقدار الشحنة التي يحملها الجسيم ومع سرعة قطع تلك الشحنة لخطوط المجال، وتثبّت نتيجةُ السلك ثابتَ التناسب بأنه كثافة الفيض نفسها — وهي قوة لورنتس، F = qvB، لجسيم يعبر المجال بزوايا قائمة (يتحرك عموديا بالنسبة للمجال). ولا يحتاج الاتجاه قاعدة جديدة كذلك: استبدل الجسيم مكان طولَ التيار القصير وستكون الاجابة نفسها الذي ينوب عنه تُجِب اليد اليسرى نفسها. ويجدر ذكر فخ واحد: التيار الاصطلاحي يمر باتجاه سير الشحنة الموجبة، فبالنسبة للإلكترون يشير التيار البديل إلى الخلف على طول الحركة، وتخرج القوة على الجانب المقابل لجسيم موجب يسلك المسار نفسه.

دفعة جانبية تحوّل الحركة إلى دائرة:

اسأل الآن: ماذا تستطيع أن تفعل قوة ثابتة المقدار، تبقى دائمًا جانبية بجسيم متحرك؟

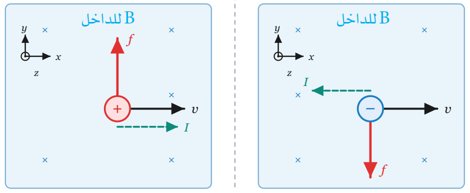
لا تستطيع أبدًا أن تزيد السرعة أو تنقصها، لأنها لا تملك قط مركّبة موازية للسرعة (القوة المتعامدة مع السرعة تغير اتجاه الحركة فقط ولا تغير مقدار السرعة) – فهي لا تبذل شغلًا، ولهذا لم يزداد تتوهّج الحزمة في الأنبوبة أثناء الانحراف. وكل ما تستطيعه هو التوجيه. وقوة ثابتة المقدار تظل تدور لتبقى عمودية على الحركة هي بالضبط شرط الدوران بمعدل ثابت، فينغلق المسار على نفسه. وبمساواة تلك القوة بمتطلَّب القوة المركزية،

$$\frac{mv^2}{r} = qvB$$

– يُختصَر عامل واحد من السرعة فورًا ويتبقّى

$$r = \frac{mv}{qB}$$

فالسرعة تقرر كم تتّسع الدائرة، لا ما إذا كانت هناك دائرة. واحمل نصف القطر ذاك إلى الزمن الدوري تُختصَر السرعة مرة ثانية، وهي المفاجأة التي أشارت إليها محاولة الاستكشاف – عند مضاعِف السرعة فإن الجسيم يكتفي بالجريِ فى دائرة مضاعفة الحجم لا غير، ويعود في نفس الزمن بالضبط. لذا فإن الكتلة والشحنة والمجال وحدهم هم الذين يحددون الزمن الدوري.



(b) شحنة سالبة

(b) شحنة موجبة

شكل (3.3.4)

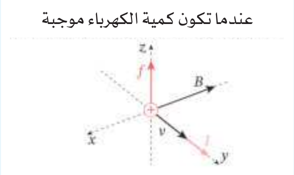
قوة لورنتس في مجال متجه إلى داخل الصفحة: للشحنة الموجبة يمر التيار المكافئ I مع V وتشير f إلى أعلى؛ وللشحنة السالبة يمر I عكس V وتشير f إلى أسفل.

نقطة

! تُسمى القوة المؤثرة على جسيم مشحون يتحرك في مجال مغناطيسي قوة لورنتز.

لتكن قوة لورنتس F (N) عندما يتحرك جسيم مشحون بشحنة q [C] بسرعة v [m/s] في اتجاه عمودي على المجال المغناطيسي في مجال كثافة فيضه B [T]،

F = vq B

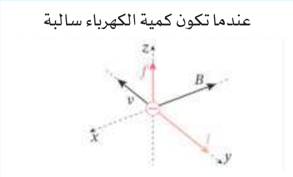


مصطلح:

قوة لورنتس — الصيغة f = qvB هي حالة التعامد ولا غير. فالجسيم المنساق بمحاذاة خطوط المجال لا يتأثر بأى قوة، والداخل بزاوية مائلة لا تدفعه إلا مركّبة سرعته العابرة للمجال، فيحتفظ بانسياقه بمحاذاة المجال ويلتفّ إلى الأمام على حلزون بدل أن يغلق دائرة.

حقيقة أساسية:

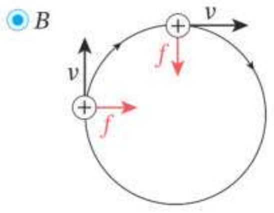
مقياس الأمر: إلكترون مُعجَّل خلال 1000 V يسير بنحو 1.9×10^{7} m/s، ومجال مقداره 1.0×10^{-3} T فقط يثنيه على دائرة نصف قطرها نحو 0.11m – حلقة تراها من عبر المنضدة. أما بروتون بالسرعة نفسها، وهو أثقل 1800 مرة، فيحتاج 1800 ضعف المجال ليلتفّ بالإحكام نفسه.



عندما تكون كمية الكهرباء سالبة

! لتحديد اتجاه قوة لورنتز، افترض تيارًا مقابلًا I واستخدم قاعدة اليد اليسرى لفليمنج. وعند استخدام قاعدة اليد اليسرى، انتبه لإشارة الشحنة واتجاه التيار.

! عندما يدخل جسيم مشحون مجالًا مغناطيسيًا منتظمًا عموديًا، تؤثر قوة لورنتس دائمًا في اتجاه عمودي على اتجاه حركة الجسيم المشحون
⇐ يقوم الجسيم المشحون بحركة دائرية منتظمة في مستوى عمودي على المجال المغناطيسي.



! معادلات الحركة الدائرية المنتظمة

$$F = \frac{mv^2}{r}$$

الزمن الدوري T

$$T = \frac{2\pi r}{v}$$

صندوق المعادلات:

قوة لورنتس: $F = qvB$ (الوحدة: N؛ v عمودية على B)

الاتجاه: قاعدة اليد اليسرى لفليمنج، التيار I مع v (شحنة موجبة) أو عكس v (شحنة سالبة)

الحركة الدائرية:

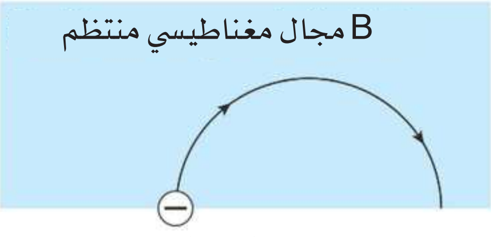
$$\frac{mv^2}{r} = qvB$$

$$r = \frac{mv}{qB}$$

الزمن الدوري T

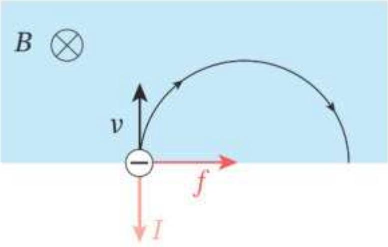
$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$

مثال محلول:



شكل (4.3.4)

المثال المحلول: إلكترون يدخل مجالًا منتظمًا B عموديًا على الصفحة ويرسم نصف دائرة داخله.



شكل (5.3.4)

الموقف:	يدخل إلكترون كتلته m وشحنته $-e$ مجالًا مغناطيسيًا منتظمًا كثافة فيضه B وعموديًا على الصفحة. يدخل عموديًا بسرعة v ويصف نصف دائرة (أ) أوجد اتجاه المجال المغناطيسي. (ب) أوجد مقدار القوة بالنيوتن التي يتعرض لها الإلكترون من المجال المغناطيسي. (ج) أوجد نصف قطر نصف الدائرة التي يرسمها الإلكترون بالمتر. (د) أوجد الزمن بالثانية الذي يستغرقه الإلكترون لقطع نصف الدائرة.
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** الكتلة m، والشحنة $-e$، والمجال B عمودي على الصفحة، وسرعة الدخول v عمودية على B. **المطلوب:** (أ) اتجاه المجال، (ب) مقدار القوة f، (ج) نصف القطر r، (د) زمن نصف الدائرة t.
التمثيل:	انظر الشكل 5-3-4: يدخل الإلكترون المجال وينحني على نصف دائرة؛ وتشير قوة لورنتز f إلى مركز تلك الدائرة في كل لحظة.
الاستراتيجية:	اتبع الخطوات المعتادة لجسيم مشحون في مجال مغناطيسي: أوجد قوة لورنتس $F = qvB$ على الجسيم، وساوِها بالقوة المركزية في معادلة الحركة $mv^2/r = qvB$، ومن ذلك حُلّ لإيجاد نصف قطر المدار r والزمن الدوري T. وثبّت اتجاه المجال بقاعدة اليد اليسرى لفليمنج، مع تذكّر أن شحنة الإلكترون سالبة فيمر تياره المكافئ عكس v.
الحل الموضح:	(أ) بقاعدة اليد اليسرى لفليمنج، تشير قوة لورنت. على الإلكترون إلى مركز مساره الدائري. وشحنة الإلكترون سالبة، فيمر التيار المكافئ I عكس v. وبتطبيق القاعدة بذلك التيار يكون المجال عموديًا على الصفحة، متجهًا إلى داخل الصفحة. (ب) بأخذ مقدار الشحنة e (وإهمال الإشارة) $f = evB$ بوحدة N. (ج) قوة لورنتز هي القوة الجاذبة المركزية: $mv^2/r = evB$؛ ومنه $r = mv^2/(evB) = mv/(eB)$ بوحدة m. (د) يستغرق نصف الدائرة نصف الزمن الدوري: $t = T/2 = \pi r/v$. وبالتعويض عن r: $t = \pi \cdot [mv/(eB)]/v = \pi m/(eB)$ بوحدة s.
منطقية الحل:	(ب) تزداد القوة مع الشحنة والسرعة والمجال، كما ينبغي لـ $f = evB$. (ج) المجال الأقوى B يعطي نصف قطر أصغر، والإلكترون الأسرع يعطي أكبر، بما يطابق ملاحظة الحزمة المنحنية. (د) زمن نصف الدائرة $\pi m/(eB)$ لا يحوي v، فالإلكترونات الأسرع والأبطأ تستغرق الزمن نفسه لإتمام الحلقة — وهو بالضبط ما تعنيه ثباتية r/v في الاستكشاف.
😲 **فسّرها بنفسك:**	في جملة واحدة، فسّر لماذا تغيّر قوة لورنتز اتجاه سرعة الإلكترون دون أن تغيّر مقدارها أبدًا.

جرِّب بنفسك: جسيم مشحون شحنته q وكتلته m يدخل مجالًا منتظمًا كثافة فيضه B بسرعة v، عموديًا على المجال. أوجد (i) مقدار قوة لورنتز التي تؤثر عليه و(ii) الزمن الدوري لحركته الدائرية.

حاول:

1. كما في الشكل 6-3-4، عندما يدخل جسيم موجب الشحنة كتلته m [kg] وشحنته q [C] مجالًا مغناطيسيًا منتظمًا عموديًا على الصفحة كثافة فيضه B [T] دخولًا عموديًا بسرعة v [m/s]، يرسم نصف دائرة. أوجد اتجاه المجال المغناطيسي.
2. أوجد الزمن بالثانية الذي يستغرقه الجسيم المشحون لقطع نصف الدائرة.
3. لكي لا يعبر الجسيم المشحون الجزء (طوله l) في الشكل ويذهب إلى الجانب الأيمن، أوجد القيمة العظمى لسرعة السقوط v بـ m/s.

في سياق

لأن نصف القطر $r = mv/(qB)$ يعتمد على كتلة الجسيم وشحنته، يعمل المجال المغناطيسي فارزًا للجسيمات المشحونة. أرسل أيونات لها نفس الشحنة والسرعة داخل مجال مغناطيسي منتظم فتنحرف كل كتلة على نصف قطرها الخاص — تنحرف الأيونات الأثقل في أقواس أوسع والأخف في أقواس أضيق — فيكشف موضع سقوط كل حزمة عن كتلتها. وهذا هو مبدأ عمل مطياف الكتلة، والفيزياء نفسها توجّه حزم الجسيمات حول حلقة مسرِّع دائري.

دورك الآن: أيونان يحملان الشحنة q نفسها ويدخلان المجال B نفسه بالسرعة v نفسها، لكن كتلة أحدهما ضعف الآخر. أوجد النسبة بين نصفَي قطر دائرتيهما.

طبيعة العلم:

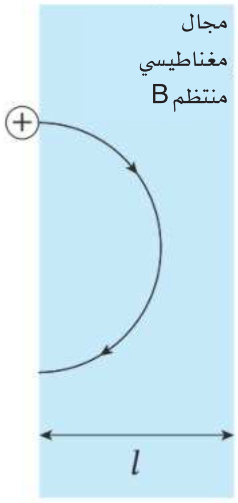
من الأصل — الشفق القطبي وقوة لورنتس. يرتبط «الشفق القطبي» الجميل المرئي في المناطق القطبية بقوة لورنتس. فالجسيمات المشحونة عالية الطاقة المتدفقة من الشمس (الرياح الشمسية) يأسرها مجال الأرض المغناطيسي ويوجّهها نحو القطبين الشمالي والجنوبي، منثنيةً في مسارات حلزونية بفعل قوة لورنتس. وحيث تصطدم بذرات الأكسجين والنيتروجين في الغلاف الجوي، تبعث الذرات ضوءًا، ويشكّل ذلك التوهّج الشفق.

وهذا يُظهر قانونًا اختُبر على حزمة فوق منضدة وهو يفسّر عرضًا بسعة السماء: فالـ $F= qvB$ نفسها التي تلوي إلكترونًا في أنبوب تحني أيضًا جسيمات الرياح الشمسية على خطوط مجال الكوكب. ويثق الفيزيائيون بذلك المدّ لأن الشفق يظهر تمامًا حيث يتنبأ النموذج — فوق القطبين المغناطيسيين، حيث يوجّه المجال الجسيمات المشحونة نزولًا إلى الهواء.

دورك الآن: اقترح ملاحظة واحدة عن أين أو متى يظهر الشفق يمكن لعالِم أن يستخدمها لاختبار فكرة أن قوة لورنتس توجّه جسيمات الرياح الشمسية نحو القطبين.

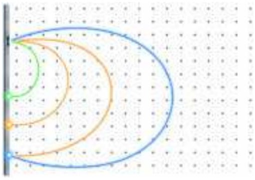
سؤال الدرس، وإجابته:

يؤثر المجال المغناطيسي بقوة لورنتز $f = qvB$ على شحنة تتحرك عبره، ويحدد اتجاهها قاعدةُ اليد اليسرى لفليمنج (التيار مع v للشحنة الموجبة، وعكسها للشحنة السالبة). ولأن تلك القوة تبقى عمودية على السرعة، فإنها تدير الشحنة دون تغيير مقدار سرعتها، فيتحرك جسيم يدخل مجالًا منتظمًا عموديًا في دائرة نصف قطرها ($r = mv/qB$) وزمنها الدوري T $T = \dfrac{2\pi r}{v} = \dfrac{2\pi m}{qB}$.



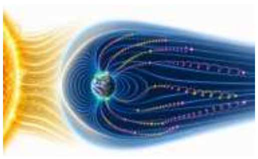
شكل (6.3.4)

جرِّب: شحنة موجبة تدخل مجالًا منتظمًا B يملأ شريطًا عرضه l وتدور عبر نصف دائرة داخله.



شكل (7.3.4)

مطياف كتلة: أيونات لها الشحنة نفسها وكتل مختلفة تسلك أقواسًا دائرية بأنصاف أقطار مختلفة، وأثقلها أقلّها انحناءً.

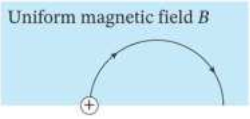


شكل (8.3.4)

جسيمات الرياح الشمسية يأسرها مجال الأرض المغناطيسي فتلتفّ حلزونيًا على خطوط المجال نحو القطبين، حيث تُضيء الغلاف الجوي شفقًا.

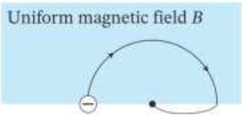
تمرين:

1. عندما يدخل جسيم موجب الشحنة كتلته m [kg] وشحنته q [C] مجالًا مغناطيسيًا منتظمًا عموديًا على الصفحة كثافة فيضه B [T] دخولًا عموديًا بسرعة v [m/s]، يرسم نصف دائرة. (i) أوجد اتجاه المجال المغناطيسي. (ii) أوجد الزمن بالثانية الذي يستغرقه الجسيم لقطع نصف الدائرة.
2. عندما يدخل إلكترون كتلته m [kg] وشحنته e– [C] مجالًا مغناطيسيًا منتظمًا عموديًا على الصفحة كثافة فيضه B [T] دخولًا عموديًا، يرسم نصف دائرة نصف قطرها a [m]. (i) أوجد اتجاه المجال المغناطيسي. (ii) أوجد سرعة سقوط الإلكترون بـ m/s.
3. كما في الشكل 11-3-4، عندما يدخل جسيم موجب الشحنة كتلته m [kg] وشحنته q [C] المجالَ المغناطيسي من موضع يبعد r [m] عن A بسرعة v [m/s] عموديًا على AB وعموديًا على المجال المغناطيسي، يطير الجسيم المشحون خارج المجال عموديًا على AD من بين A و D، على بُعد r [m] من A. (i) أوجد اتجاه المجال المغناطيسي. (ii) أوجد مقدار كثافة الفيض المغناطيسي بالتسلا. (iii) أوجد الزمن بالثانية الذي يستغرقه من دخول الجسيم المشحون المجالَ المغناطيسي حتى طيرانه خارجه.



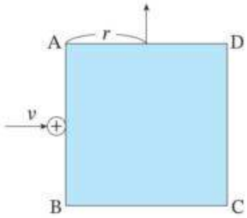
شكل (9.3.4)

تمرين 1: شحنة موجبة تدخل المجال المنتظم B من أسفل وترسم نصف دائرة داخله.



شكل (10.3.4)

تمرين 2: الإلكترون يدخل المجال المنتظم B ويدور عبر نصف دائرة نصف قطرها a.



شكل (11.3.4)

تمرين 3: الجسيم يعبر AB على بُعد r من A، متحركًا عموديًا على AB، ويغادر عبر AD على المسافة r نفسها من A.

الدرس ٤-٤ — الحث الكهرومغناطيسي

؟ سؤال الدرس:

لماذا يمر تيار في ملف عند تقريب أو ابعاد مغناطيس منه ، دون توصيل أي بطارية؟

ستتعلم أن

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تعرّف** الفيض المغناطيسي بالعلاقة $\Phi_B = BA$ ، أي حاصل ضرب كثافة الفيض B في مساحة A عمودية على المجال، وتقاس بوحدة الوبر Wb.

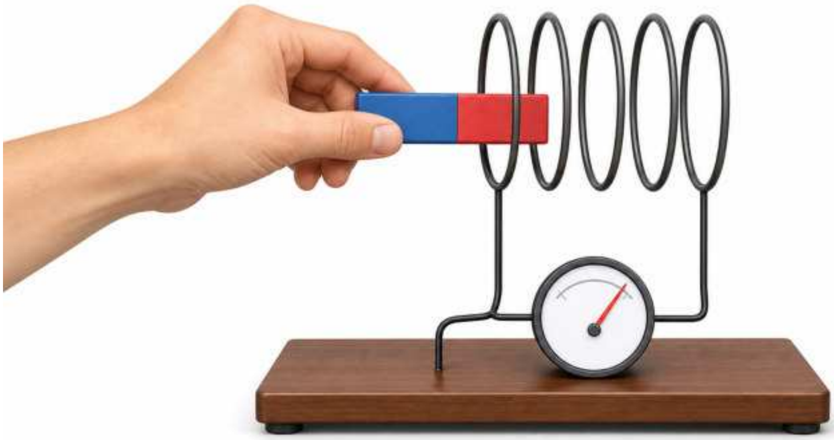
٢. **تطبق** قانون فاراداي للحث $\mathcal{E} = -N\Delta\Phi_B/\Delta t$ لحساب مقدار القوة الدافعة الكهربية المستحثة في ملف عدد لفاته N.

٣. **تستخدم** قاعدة لنز لتحديد اتجاه التيار المستحث في ملف، بحيث يعاكس الفيضُ المغناطيسي الناشئ عنه التغيّرَ في الفيض المغناطيسي الخارجي.

فكرة أساسية:

الفيض المغناطيسي Φ_B (Wb) — كثافة الفيض B مضروبة في المساحة A التي يخترقها. فما الذي يجب أن يفعله Φ_B قبل أن تُظهر دائرة قوة دافعة كهربية، وما الذي يحدد مقدارها؟

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر



شكل (1.4.4)

ملف موصول بجلفانومتر وحده، بلا بطارية؛ وتحريك المغناطيس القضيبي على محور الملف يحرّك الإبرة بينما يتغيّر المجال خلال الملف.

توقَّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) هل ينتج التيار لأن المغناطيس قريب من الملف، أم لأن المجال المغناطيسي خلال الملف يتغيّر؟

(ب) إذا زادت سرعة المغناطيس إلى الضعف، ماذا يحدث لزاوية الانحراف، ولماذا؟

استكشف — دراسة أثر المسافة على الاتزان

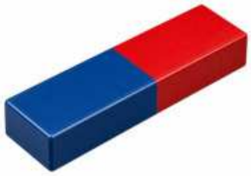
ما ستفعله: حرّك المغناطيس خلال ملف بسرعات مختلفة ووضح كيف يتحكّم معدّل تغيّر الفيض المغناطيسي في مقدار القوة الدافعة المستحثة واتجاهها.

الزمن: 15 دقيقة

ما تحتاجه:

- ملف عدد لفاته كثيرة.
- قلم رصاص ليكون نقطة ارتكاز أسفل منتصف المسطرة.
- جلفانومتر صفر التدريج في المنتصف.
- مغناطيس.
- مسطرة وساعة إيقاف وأسلاك توصيل.

مسطرة


مغناطيس

جلفانومتر

ملف

الخطوات:

١ صِل الملف بالجلفانومتر، دون بطارية، واضبط المؤشر على الصفر في المنتصف.

٢ حدد مسافة انتقال ثابتة على المنضدة بالمسطرة؛ ومع إبقاء المغناطيس ساكنًا في الخارج، تأكّد أن المؤشر يقرأ صفرًا.

٣ حرك المغناطيس عبر تلك المسافة نفسها داخل الملف — مرة ببطء ومرة بسرعة — مسجّلًا الزمن Δt وأقصى زاوية انحراف (المقدار والجهة)؛ ثم أمسكه ساكنًا في الداخل وراقب القراءة تعود إلى الصفر.

٤ اسحب المغناطيس خارجًا عبر نفس المسافة ، ولاحظ أن الانحراف صار في الاتجاه المعاكس، واحسب 1 / Δt لكل محاولة .

المحاولة	الفعل: إدخال أو تثبيت أو إخراج	زمن الحركة Δt بالثانية.	أقصى انحراف وتقسيماته وجهته يسارًا أو يمينًا	المعدل 1 /Δt بوحدة s^{-1}
1				
2				
3				

حلّل ما جمعته:

(أ) عندما يزداد المعدل 1 / Δt بتحريك نفس المغناطيس أسرع خلال نفس المسافة ، ماذا يحدث لأقصى انحراف ؟ وكيف تقارن محاولة تثبيت المغناطيس ؟

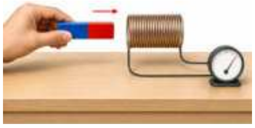
(ب) لأن المغناطيس نفسه خلال المسافة نفسها يعطي ΔΦ نفسه، فماذا يكشف النمط عن $V = -N\,\Delta\Phi/\Delta t$ ؟ ولماذا يؤدي إدخال وإخراج المغناطيس إلى انحرافين متعاكسين ؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

الفيض المغناطيسي يقيس المجال خلال مساحة

ارسم مجالًا يمثل مجموعة من الخطوط ودع ازدحامها يمثّل شدته و يصبح من السهل طرح سؤال ثانٍ وأكبر: أن مدى قوة المجال ليس عند نقطة معينة، بل ما تحيط بها من مساحة . هذا


شكل (2.4.4)

إعداد المنضدة: ملف من لفات كثيرة متصل بجلفانومتر صفر التدريج في المنتصف؛ ويُدخَل المغناطيس في الملف ويُسحَب منه على محوره.

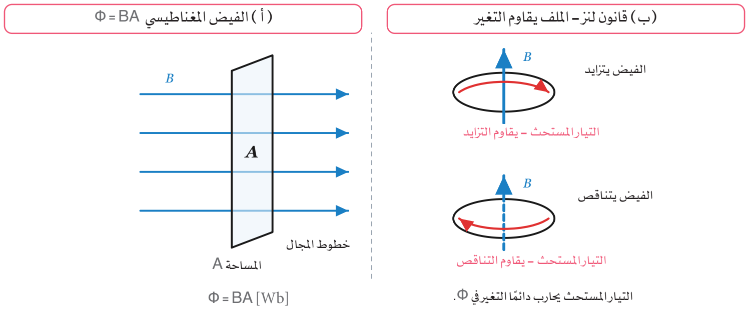
ملاحظة عملية:

اقرأ ذروة الانحراف في اللحظة التي يكون فيها المغناطيس أسرع ما يكون، وحرّك المغناطيس عبر المسافة المعلّمة نفسها في كل محاولة حتى لا يتغيّر إلا الزمن Δt — فيبقى تغيّر الفيض $\Delta\Phi_B$ كما هو.

المجموع هو ما يمثله الفيض المغناطيسي Φ_B — مدى كثافة خطوط المجال، مضروبةً في مقدار المساحة التي تمر من خلالها. يمكن لحلقتين موجودتين في نفس المجال أن تحيطا بمجاميع مختلفة تمامًا، ويمكن لحلقة واحدة أن تحيط بمجاميع مختلفة عند إمالتها، لأن الحلقة المائلة تعمل على تقليل الخطوط التى تمر خلالها. فقط الحلقة الموضوعة بشكل عمودي على المجال تقطع الخطوط كاملا B، وهذا هو الافتراض المطبق في كل مكان في هذا الدرس. ووحدته تتبع من حاصل الضرب (الناتج): تسلا . متر مربع (الوبر).

الفيض المتغيّر يولد قوة دافعة كهربية:

تجربتك تفصل بين الأمرين اللذين كان من الممكن أن يكونا ذوي أهمية. فعند إبقاء المغناطيس ثابتًا، سواء كان مضغوطًا على الملف أو بعيدًا عنه، لم ينتج عن ذلك أي شيء على الإطلاق — لذا فإن مقدار الفيض الذي يمر عبر الملف لا يمكن أن يكون هو ما يحرك الإبرة. أما تحريك نفس المغناطيس عبر نفس المسافة المحددة بسرعة مضاعفة، فقد أدى إلى التغير نفسه في نصف الوقت، وتضاعف الانحراف. ما يستجيب له الملف، إذن، هو المعدل: فالقوة الدافعة الكهربية تتبع $\Delta\Phi_B/\Delta t$.. كل لفة هي حلقة أخرى تحيط بنفس التغير، لذا فإن N لفات تزيد النتيجة N مرات — وهذا هو السبب في أن الملف المختبري يُلف بمئات اللفات. عندما تكون الحلقة صلبة، يكون المجال وحده هو الذي يمكنه التغير، لذا فإن التغير في الفيض (التدفق) يُحسب من التغير في B وحده. وهذا يترك الإشارة، وهي ليست مجرد زخرفة. لنفترض أن التيار المستحث ساعد التغير بدل مقاومته لاستمر في الزيادة بلا طاقة مزودة لذا يجب عليه أن يقاوم التغير بدلاً من ذلك. وتمثل الإشارة السالبة في قانون فاراداي على قانون حفظ الطاقة، وهذا هو مغزى علامة السالب — التي تُعرف كقاعدة عملية، وهي قانون لنز. خذ المقدار عندما يكون مقدار القوة الدافعة الكهربية هو المطلوب فقط، وحدد الاتجاه بناءً على تلك القاعدة.

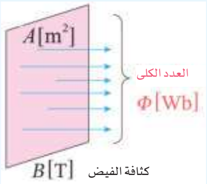

(ب) قانون لنز – الملف يقاوم التغير
B
الفيض يتزايد
التيار المستحث – يقاوم التزايد
B
الفيض يتناقص
التيار المستحث – يقاوم التناقص
التيار المستحث يحارب دائمًا التغير في Φ.
(أ) الفيض المغناطيسي Φ = BA
B
A
خطوط المجال
المساحة A
Φ = BA [Wb]

شكل (3-4-4): يسارًا: خطوط مجال كثافتها B خلال مساحة A تعطي الفيض $\Phi = BA$. يمينًا: بقانون لنز يدور التيار المستحث بحيث يعارض فيضُه التغيّرَ — مقاومًا الزيادة (أعلى) والنقصان (أسفل).

نقطة

! تُسمى الخطوط الممثِّلة لحالة كثافة الفيض المغناطيسي خطوط المجال المغناطيسي. وفي مجال مغناطيسي منتظم كثافة فيضه B [T]، يمر B من خطوط المجال المغناطيسي خلال مساحة $1\ m^2$ عمودية على المجال.

ويُسمى العدد الكلي لخطوط المجال المغناطيسي المارّة خلال منطقة كثافة فيضها المغناطيسي B [T] ومساحتها A [m^2] الفيضَ المغناطيسي Φ_B. والوحدة المستخدَمة هي الوبر (رمزها Wb).



مصطلح:

الفيض المغناطيسي — إن التعبير عنه يفترض أمرين في آنٍ واحد: أن يكون المجال متماثلاً في كل نقطة على امتداد الحلقة، وأن تكون الحلقة مواجهةً له بشكل عمودي. فإذا تم إمالة الحلقة، لا يُعتد إلا بمسقطها؛ وإذا تفاوتت شدة المجال من موضع لآخر، يجب استبدال حاصل الضرب بمجموع لقيمٍ على مساحات صغيرة، لكل منها قيمة خاصة للمجال (B).

التيار الدوامي — تيار حثّي حلقي ينشأ داخل جسم موصل مصمت بفعل مجال مغناطيسي متغير، كما هو الحال في أجهزة التسخين بالحث المغناطيسي

حقيقة أساسية:

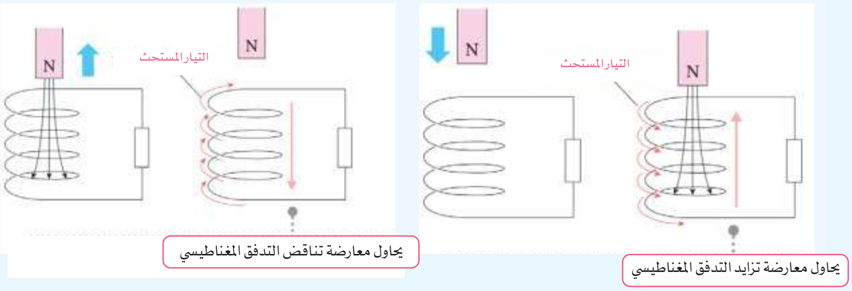
قبل لكل 500 لفة بمساحة مقطع عرضي تبلغ 2 سم^2، موضوعة في مجال مغناطيسي تتغير شدته بمقدار 1 تسلا خلال عُشر ثانية، تُنتج جهداً كهربائياً يبلغ حوالي 1 فولت. ولهذا السبب يُصنَّع المولد الكهربى من لفات عديدة تدور بسرعة بدلاً من الاعتماد على مغناطيس واحد ضخم؛ فتكلفة توفير معدل التغير هذا أقل بكثير من تكلفة توليد المجال المغناطيسي ذاته.

ملاحظة:

ثمة خطآن منفصلان يتعلقان بمفهوم "الدلتا" (التغير): يتمثل الخطأ الأول في استخدام قيمة نفس الفيض المغناطيسي بدلاً من قيمة *التغير*

! تُسمى الظاهرة التي تتولّد فيها فرق جهد في ملف بسبب تغيّر في المجال المغناطيسي داخله الحثَّ الكهرومغناطيسي. وتُسمى فرق الجهد المتولّدة بالقوةَ الدافعة الكهربية المستحثة، ويُسمى التيار الذي يمر نتيجة لها التيارَ المستحث.

! تتولّد القوة الدافعة الكهربية المستحثة في اتجاه يجعل الفيض المغناطيسي الذي ينتجه التيار المستحث معاكسًا للتغيّر في الفيض المغناطيسي المطبَّق خارجيًا.


N
التيار المستحث
N
يحاول معارضة تناقص التدفق المغناطيسي
N
التيار المستحث
N
يحاول معارضة تزايد التدفق المغناطيسي

تتعين قيمة القوة الدافعة الكهربية المسنحثة ε(V) عندما يتغير التدفق المغناطيسي داخل ملف ذي N لفة إلى ΔΦ [Wb] بعد Δt ثانية ε = (-N ΔΦ)/Δt

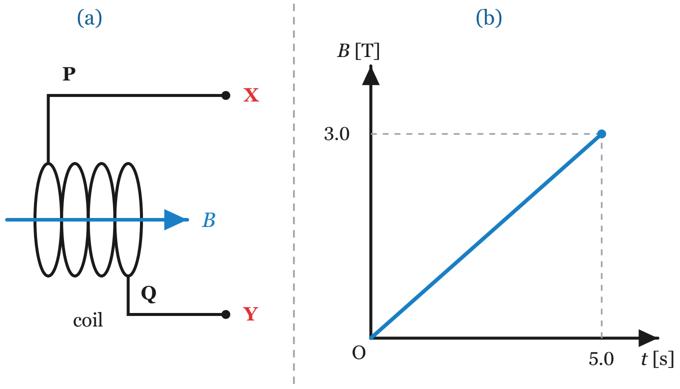
التغيّر في الفيض $\Delta\Phi_B$ يمكن أن يتعين من العلاقة: $\Delta\Phi_B = \Delta AB$ ومع ذلك، عند تحديد مقدار القوة الدافعة الكهربية المستحثة نستخدم ε

$$\varepsilon = \left| \frac{-N\,\Delta\Phi}{\Delta t} \right|$$

صندوق المعادلات:

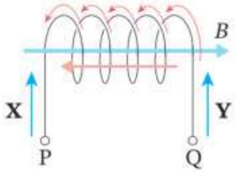
الفيض المغناطيسي:	$\Phi_B = BA$ (الوحدة: وبر، Wb)
قانون فاراداي:	$\varepsilon = (-N\,\Delta\Phi)/\Delta t$
تغيّر الفيض	$\Delta\Phi_B$: $\Phi_B = \Delta AB$ مجال منتظم، مساحة ثابتة

مثال محلول:



شكل (1-4-4): (أ) الملف بطرفيه P وQ، والنقطتان الخارجيتان X وY، وسهم الإسناد B الذي يثبّت اتجاه المجال الموجب. (ب) كثافة الفيض B ترتفع بانتظام من O إلى 3.0 T عند t = 5.0 s.

في ذلك الفيض؛ فوضع ملفٍ ساكنٍ داخل أقوى مجال مغناطيسي ثابت في الغرفة لا يولد أي تيار أو جهد مستحث مطلقا. أما الخطأ الثاني فيكمن في استخدام الفترة الزمنية التي قضيتها في المراقبة بدلاً من استخدام الفترة الزمنية التي استغرقها التغير الفعلي؛ فالمغناطيس الذي يسقط عبر ملف خلال 0,05 ثانية ثم يظل ساكناً لمدة دقيقة يمثل حدثاً زمنياً مدته 0,05 ثانية فقط، وبالتالي فإن القسمة على 60 ثانية تؤدي إلى التقليل من قيمة القوة الدافعة الكهربائية (emf) بمقدار ألف ضعف.



شكل (5.4.4)

- المثال المحلول (b): التيار المستحث في الملف، مرسومًا بالأحمر، ينشئ مجالًا يعارض نمو B، فيمر التيار في الدائرة الخارجية نحو Y.

الموقف:	تتغير كثافة الفيض B داخل ملف عدد لفاته 500 ومساحة مقطعه $2.0 \times 10^{-4}\ m^2$، والمجال منتظم واتجاه السهم في الشكل موجب كما في الشكل 4-4-4b، للإعداد المبيّن في الشكل 4-4-4a. وكثافة الفيض المغناطيسي داخل الملف منتظمة، ويُؤخَذ اتجاه السهم في الشكل 4-4-4a موجبًا. (أ) أوجد مقدار القوة الدافعة الكهربية المستحثة المتولّدة بين P وQ للملف بالفولت. (ب) عند توصيل مقاومة بين P وQ، حدِّد ما إذا كان التيار يمر نحو X أم نحو Y في الشكل 4-4-4a.
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** • N = 500، و$S = 2.0 \times 10^{-4}\ m^2$. من الرسم تزداد كثافة الفيض بانتظام في الاتجاه الموجب بمقدار $\Delta B = 3.0$ T خلال $\Delta t = 5.0$ s. **المطلوب:** (أ) مقدار القوة الدافعة [V] ε الظاهرة عبر P وQ. (ب) أي اتجاه يمر فيه تيارها حول الدائرة — نحو X أم نحو Y.
التمثيل:	انظر الشكل 4-4-4: اللوحة (أ) تُظهر الملف بطرفيه P وQ وسهم الإسناد B المشيربين X وY؛ واللوحة (ب) هي التمثيل البياني الخطي لـB مقابل t مرتفعًا من O إلى 3.0 T عند 5.0 s. والشكل 4-4-5 يحمل إجابة (b): التيار المستحث مرسومًا على الملف نفسه.
الاستراتيجية:	اقرأ ΔB وΔt مباشرة من التمثيل البياني، وحوّلهما إلى تغيّر في الفيض بمساحة الملف نفسها، ومرّر ذلك المعدّل خلال قانون فاراداي لإيجاد المقدار. واحسم الاتجاه بسؤال منفصل: بأي اتجاه يجب أن يدور تيار ليعارض مجالُه الخاص النموَّ الذي يُظهره التمثيل البياني؟
الحل الموضح:	(أ) لتكن ε هي القيمة المطلوبة. ومنه $\Delta\Phi_B = \Delta B \cdot A = 3.0 \times (2.0 \times 10^{-4}) = 6.0 \times 10^{-4}$ Wb. $\varepsilon = \lvert -500 \times (6.0 \times 10^{-4}) \div 5.0 \rvert = 6.0 \times 10^{-2}$ V.. (ب) التمثيل البياني يرتفع، إذن المجال في الاتجاه الموجب ينمو. فيردّ الملف بدورانٍ يشير مجالُه الخاص في الاتجاه الآخر، إلى اليسار، وذلك الاتجاه هو Y.
منطقية الحل:	بإعادة الكتابة، $\varepsilon = N A \cdot (\Delta B/\Delta t) = 500 \times 2.0 \times 10^{-4} \times (3.0/5.0) = 0.10 \times 0.60 = 0.060$ V، وهو يوافق 6.0×10^{-2} V. وY هو الاتجاه الذي يدفع مجالُه الخاص ضد النمو؛ أما الاتجاه الآخر فكان سيغذّيه، وكانت الطاقة ستظهر من العدم.
فسّرها بنفسك:	في جملة واحدة، قل لماذا تنعكس إجابة (ب) لو كان التمثيل البياني في الشكل 4-4-4b منحدرًا إلى أسفل بدل أن يرتفع.

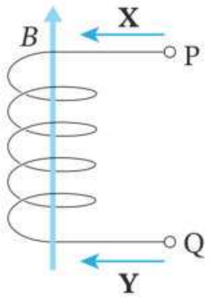
والآن حاول أنت: والآن حاول أنت: ملف من 200 لفة ومساحته $3.0 \times 10^{-4}\ m^2$ يقع في مجال منتظم ترتفع كثافته بانتظام بمقدار 2.0 T في 4.0 s. أوجد مقدار القوة الدافعة الكهربية المستحثة.

حاول:

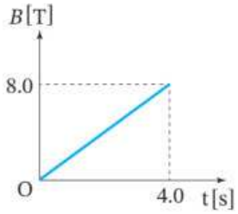
ترتفع كثافة الفيض المغناطيسي B [T] داخل ملف من 100 لفة ومساحة مقطعه $2.0 \times 10^{-4}\ m^2$ بانتظام بمقدار 8.0 T خلال 4.0 s، للإعداد المبيّن في الشكل 6-4-4. وكثافة الفيض داخل الملف منتظمة، ويُؤخَذ اتجاه السهم في الشكل 6-4-4 موجبًا.

(أ) أوجد مقدار القوة الدافعة الكهربية المستحثة المتولّدة عبر الملف بالفولت.

(ب) عند توصيل مقاومة بين P وQ، حدِّد ما إذا كان التيار يمر في اتجاه X أم Y في الشكل 6-4-4.



شكل (6.4.4) جرِّب: الملف بطرفيه P وQ، وسهم الإسناد B المثبَّت للاتجاه الموجب، والاتجاهان X وY في الدائرة الخارجية.



شكل (7.4.4) جرِّب: كثافة الفيض داخل الملف ترتفع بانتظام من O إلى 8.0 T عند t = 4.0 s.

في سياق جديد

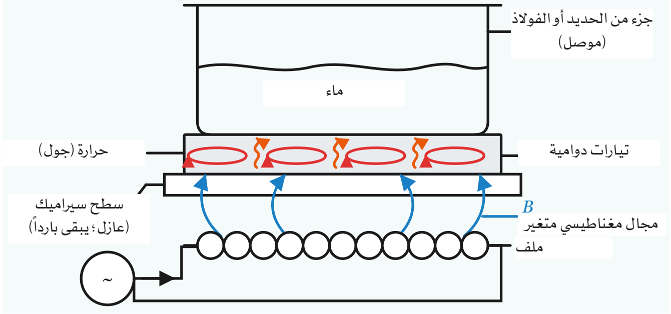
يمر هذا القانون نفسه في كل مولّد كهربي. ففي دينامو دراجة أو مولّد محطة قدرة، يُدار ملف في مجال مغناطيسي (أو يُدار مغناطيس أمام ملف ثابت)، فيرتفع الفيض خلال الملف ويهبط باستمرار. وبحسب $\mathcal{E} = -N\,\Delta\Phi_B/\Delta t$، يعطي الدوران الأسرع أو زيادة اللفات قوةً دافعة كهربية أكبر — وهو بعينه سبب استخدام المولّدات ملفاتٍ كثيرة اللفات ودورانها السريع.

دورك الآن: ملف مولّد من 200 لفة ومساحته $5.0 \times 10^{-4} m^2$ يقع في مجال يتغيّر بانتظام من 0 إلى 0.40 T في 0.10 s. أوجد مقدار القوة الدافعة الكهربية المستحثة.

شكل (8.4.4) دينامو دراجة: مغناطيس دوّار يغيّر الفيض خلال ملف، فيستحثّ قوة دافعة تُضيء المصباح.

طبيعة العلم:

من الأصل — سخّانات الطهي بالحث والتيارات الدوّامية. يستخدم «سخّان الطهي بالحث»، الذي يستطيع غلي الماء دون استعمال لهب، الحثَّ الكهرومغناطيسي. فعندما يُغيِّر التيار في الملف الداخلي تغييرًا سريعًا لتغيير المجال المغناطيسي، يُستحَثّ تيار دوّامي في قاع الإناء المعدني الموضوع فوقه. ويسخن الإناء بحرارة جول المتحرّرة بمرور هذا التيار خلال المقاومة الكهربية للإناء نفسه.


جزء من الحديد أو الفولاذ (موصل)
ماء
حرارة (جول)
تيارات دوامية
سطح سيراميك (عازل؛ يبقى باردًا)
B
مجال مغناطيسي متغير
ملف
~

؟؟؟؟؟؟

شكل (9-4-4): داخل سخّان طهي بالحث. تيار سريع التغيّر في الملف أسفل السطح الخزفي يرسل مجالًا مغناطيسيًا متغيّرًا صاعدًا خلاله إلى قاعدة الإناء. ولأن تلك القاعدة موصّلة، يقود الفيض المتغيّر تياراتٍ دوّامية داخل المعدن، وتسخينها الجولي يدفئ الإناء نفسه — ويظل السطح الخزفي باردًا.

والمبدأ نفسه الذي يُضيء جلفانومترًا يطهو الطعام أيضًا: فالفيض السريع التغيّر يقود تيارات حقيقية في الموصّلات المجاورة. ويتتبّع العلماء قانون فاراداي من عرض مخبري إلى جهاز منزلي يومي، وهكذا يكتسب نموذج فيزيائي الثقة بتفسيره مواقف منفصلة كثيرة دفعة واحدة.

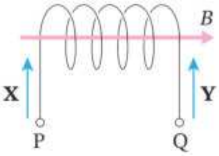
دورك الآن: اقترح لماذا يعمل سخّان الحث مع إناء حديدي لا زجاجي.

؟؟؟؟؟؟

سؤال الدرس، وإجابته:

يمر تيار لأن تحريك المغناطيس يغيّر الفيض المغناطيسي خلال الملف، والفيض المتغيّر يستحثّ قوة دافعة كهربية حتى مع عدم وجود بطارية. وبقانون فاراداي تكون القوة الدافعة الكهربية المستحثة $\varepsilon = -N\,\Delta\Phi B/\Delta t$، فلا تظهر إلا بينما يتغيّر الفيض وتنمو مع معدّل التغيّر؛ وبقانون لنز يعارض اتجاهُها ذلك التغيّرَ دائمًا.

تمرين:



شكل (4-4-10) تمرين 3: الملف بطرفيه P وQ، وسهم الإسناد B، والاتجاهان X وY في الدائرة الخارجية.

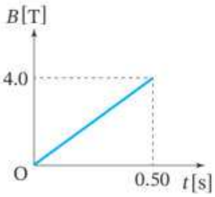
١. تغيّر الفيض المغناطيسي المارّ خلال ملف من 200 لفة بمقدار 2.5×10^{-4} Wb في 0.20 ثانية. أوجد مقدار القوة الدافعة الكهربية المستحثة المتولّدة عبر الملف بالفولت.

٢. تغيّرت كثافة الفيض المغناطيسي داخل ملف من 100 لفة ومساحة مقطعه 4.0×10^{-4} m² بمقدار 0.60 T بمعدل ثابت في 4.0×10^{-2} ثانية. أوجد مقدار القوة الدافعة الكهربية المستحثة المتولّدة عبر الملف بالفولت.

٣. ترتفع كثافة الفيض المغناطيسي B [T] داخل ملف من 200 لفة ومساحة مقطعه 1.2×10^{-3} m² بانتظام بمقدار 4.0 T خلال 0.50 s، للإعداد المبيّن في الشكل 10-4-4. وكثافة الفيض داخل الملف منتظمة، ويُؤخَذ اتجاه السهم في الشكل 10-4-4 موجبًا.

(i) أوجد مقدار القوة الدافعة الكهربية المستحثة المتولّدة بين P وQ للملف بالفولت.

(ii) عند توصيل مقاومة بين P وQ، حدِّد ما إذا كان التيار يمر في اتجاه X أم Y في الشكل 10-4-4.



شكل (4-4-11) تمرين 3: كثافة الفيض داخل الملف ترتفع بانتظام من O إلى 4.0 T عند t = 0.50 s.

الدرس ٤-٥ — الحث الذاتي

؟ سؤال الدرس:
لماذا لا يتوقف التيار المار في ملفٍ ما فوراً، حتى لو حاولت إيقافه فجأة؟

ستتعلم أن

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تشرح** سبب مقاومة الملف لأي محاولة لتغيير التيار المار فيه، وتحسب مقدار القوة الدافعة الكهربية العكسية (back emf) الناتجة عن معدل تغير معين.

٢. **حلل** مسألة تتضمن عملية تبديل (المفتاح) عند اللحظتين البسيطتين: لحظة تحريك المفتاح، واللحظة التي تلي ذلك بفترة طويلة، وتحدد قيمة كل من التيار والقوة الدافعة الكهربية العكسية في كلتا الحالتين.

٣. **تحسب** مقدار الطاقة التي يختزنها الملف الذي يمر به تيار، وتحدد ما التحول في هذه الطاقة عند قطع الدائرة الكهربية.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر

عند إطفاء مروحة كهربية أو مثقاب كهربي من مفتاح الحائط، قد تلمح شرارة زرقاء صغيرة بين نقاط التلامس؛ فملفات المحرك كانت تسري فيها شدة تيار ثابتة، وفي اللحظة التي يقطع فيها المفتاح هذا التيار، تقاوم الملفات ذلك التغير المفاجئ، مما يولد جهداً كهربيا كبيرا يدفع التيار للاستمرار لفترة زمنية قصيرة، فيقفز عبر الفجوة المتسعة على هيئة شرارة. أما عند إعادة التشغيل، فلا يصل التيار إلى قيمته القصوى مرة واحدة، بل يتزايد تدريجياً؛ إذ تنشأ في الملف مقاومةً لأي تغير يطرأ على التيار المار فيه، سواء عند بدء سريانه أو عند توقفه.

فكرة أساسية:
الحث الذاتي — ظهور قوة دافعة كهربية مستحثة في ملف بسبب تغيّر تيار نفس الملف.

self-induced spark

شكل (1.5.4) إطفاء دائرة تحمل ملفًا: مع قطع التيار، يستحثّ الملف فرق جهد كبيرة تُشرِر عبر التلامسات المنفتحة.

تنبأ:

(أ) عندما تغلق المفتاح، هل يبلغ التيار في الملف قيمته العظمى في لحظة الغلق، أم يتزايد تدريجيًا؟

(ب) في اللحظة التي يفتح فيها المفتاح، هل تكون القوة الدافعة الكهربية التي يستحثها الملف صغيرة، أم كبيرة بما يكفي لإحداث شرارة؟

استكشف — ومضة قطع التيار

ما ستفعله: ما ستفعله: تقطع تيار ملف ثابتًا بسرعات مختلفة وتقرأ ومضة النيون التي يُطلقها، فيتكشّف أن القوة الدافعة المستحثة تنمو مع معدّل تغيّر التيار.

الزمن: 15 دقيقة

ما تحتاجه:

- ملف من لفات كثيرة.
- بطارية القوة الدافعة الكهربية لها صغيرة.
- مفتاح.
- مصباح نيون (يضئ عند 90V).
- أميتر لقراءة التيار الثابت قبل فتح المفتاح.

مصباح نيون

مفتاح

بطارية

ملف

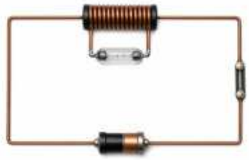
الخطوات:

١ صِل ملفًا من لفات كثيرة على التوالي مع بطارية القوة الدافعة الكهربية لها صغيرة ومفتاح، وصِل مصباح نيون عبر الملف؛ فالمصباح لا يضئ إلا فوق نحو تنسق 90V ويعمم، وهي أكثر بكثير مما تمدّه البطارية.

٢ أغلِق المفتاح، حتى تثبت شدة التيار، وتأكّد أن المصباح يظل غير مضئ.

٣ افتح المفتاح لقطع التيار؛ وعين زمن القطع Δt ولاحظ شدة سطوع مصباح النيون.

٤ كرِّر، فاتحًا المفتاح ببطء أكبر(Δt أكبر)؛ واحسب لكل محاولة معدّل الانخفاض (الانهيار) $\frac{I}{\Delta t} = \frac{\Delta I}{\Delta t}$ وسجله في العمود الأخير.


شكل (2.5.4) مصباح نيون موصول عبر الملف؛ ومع تيار ثابت يبقى المصباح مظلمًا، لأن فرق جهد البطارية الصغيرة أدنى بكثير من فرق جهد المطلوب لإضاءته.

ملاحظة عملية:
الومضة قصيرة جدًا، فراقب المصباح في غرفة معتمة. وافتح المفتاح بقطعة نظيفة لقطع التيار سريعًا، وثِق بالاتجاه العام عبر التشغيلات أكثر من أي ومضة مفردة.

المحاولة	كيف تفتح المفتاح	سرعة القطع (بطيء/سريع)	سطوع الاضاءة (مظلم/خافت/ساطع)	المعدل النسبي للانخفاض (الانهيار) (صغير/كبير)
1	سريعا			
2	متوسط			
3	ببطء			

حلّل ما جمعته:

(أ) انظر إلى العمود الأخير: مع نمو معدّل الهبوط $\frac{L\Delta I}{\Delta t}$ ، ماذا يحدث لسطوع الومضة؟ وماذا يخبرك ذلك عن مقدار القوة الدافعة المستحثة؟

(ب) يحتاج النيون نحو 90 V ليضيء، ومع ذلك لا تعطي البطارية إلا فرق جهد صغير — توقَّع كم يجب أن تبلغ القوة الدافعة المستحثة لحظةَ إضاءة ساطعة، واربط جوابك بـ $\mathcal{E}=\left|\frac{-L\,\Delta I}{\Delta t}\right|$.

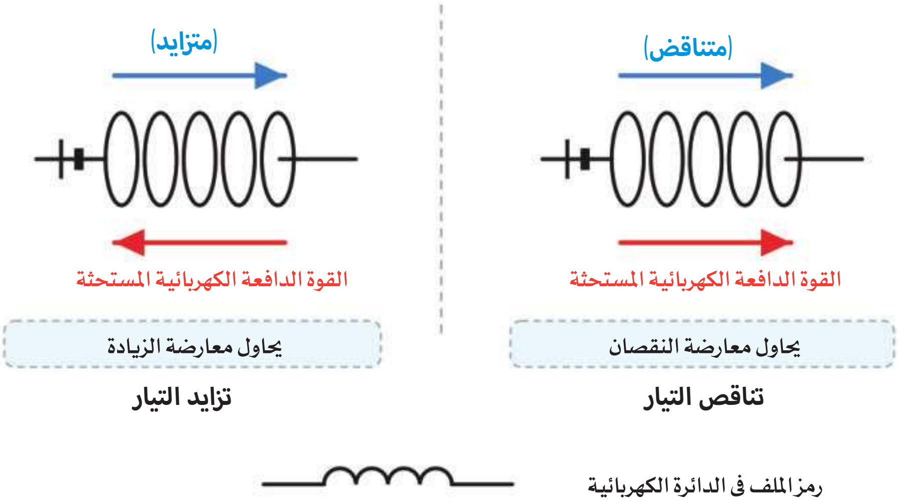
اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

الملف يقاوم أي تغيّر للتيار المار به المصباح دلّك على موضع النظر. فالتيار الثابت تركه مظلمًا، مع أن ذلك التيار كان يمر طوال الوقت؛ ولم تُضئه إلا لحظة القطع، وكانت المحاولات التي زاد فيها عمودها الأخير — معدّل الهبوط — هي التي أومضت أسطع. إذن الملف لا يستجيب لتيار بل لتيار متغيّر، ويستجيب بفرق جهد تفوق كثيرًا البطارية التي كانت تدفعه، إذ لا يضيء النيون دون نحو 90V. ولا شيء في ذلك يتجاوز الدرس السابق؛ فالحلقة أُغلِقت على نفسها فحسب. فالملف يطوّق المجال الذي يصنعه بعينه، فرفع التيار فيه يرفع الفيض المخترق له، وبقانون فاراداي يُنتج الفيض المرتفع فرق جهد — هذه المرة في اللفّة نفسها التي سبّبته. ثم تثبّت قاعدة لنز اتجاه تلك فرق الجهد: لا بد أن تقاوم ما يفعله التيار، فتكبحه وهو يزداد وتسنده وهو يقل. ومن هنا جاء اسم التأثير.

حقيقة أساسية:

اقطع 3A من ملف قيمته 0.10H في جزء من ألف من الثانية يظهر خلاله نحو 300 V — مئة ضعف الخلية التي كانت تدفعه، وكافية بسهولة لقفز الفجوة المتّسعة في مفتاح ينفتح. وأبطئ القطع نفسه إلى عُشر ثانية تهبط إلى 3 V، ولا تُرى شرارة.


(متناقص)
القوة الدافعة الكهربائية المستحثة
يحاول معارضة النقصان
تناقص التيار
(متزايد)
القوة الدافعة الكهربائية المستحثة
يحاول معارضة الزيادة
تزايد التيار
رمز الملف في الدائرة الكهربائية

شكل (3.5.4) عندما يرتفع التيار يستحثّ الملف قوة دافعة تعارض الزيادة؛ وعندما يهبط يستحثّ قوة دافعة تعارض النقصان. وإلى جانبهما رمز الملف في الدوائر.

ما مقدار القوة الدافعة المستحثة؟

لنتبع التسلسل التالي: يتناسب الفيض المغناطيسي الذي يولده الملف طردياً مع شدة التيار المار فيه، كما يتناسب الجهد الكهربي طردياً مع معدل تغير ذلك الفيض. وبما أن لدينا علاقتي تناسب متتاليتين، فيمكن وضعهما في علاقة واحدة؛ إذ يصبح بالإمكان تحديد الجهد بناءً على معدل تغير التيار وحده، مع وجود ثابت تناسب وحيد يربط بينهما. يجمع هذا الثابت كافة الخصائص الهندسية للملف — مثل عدد اللفات، ومدى إحكام اللف، وطبيعة القلب الذي يلتف حوله — في قيمة رقمية واحدة؛ ولهذا السبب تدرج ورقة البيانات هذه القيمة دون الحاجة لسؤالك عن تفاصيل عملية اللف. وتُعد وحدة القياس هذه كبيرة؛ فالملف الذي تبلغ معامل حثه "هنري" واحداً يولد جهداً قدره فولت واحد استجابةً لتغير في التيار بمعدل أمبير واحد في الثانية. أما الإشارة السالبة فهي مجرد اصطلاح رياضي يعبر عن الاتجاه الذي سبق توضيحه؛ لذا، اكتفِ بأخذ المقدار العددي (القيمة المطلقة) عندما يكون هو المطلوب.

الملف في دائرة تيار مستمر

يمكن تحديد حالتين زمنيتين دون الحاجة إلى إجراء حسابات معقدة للمتغيرات الزمنية. ففي الحالة الأولى — أي لحظة تحريك المفتاح — لا يمكن للملف أن يغير حالته الراهنة فوراً؛ إذ إن حدوث قفزة مفاجئة في التيار يعني وجود معدل تغير لا نهائي وقوة دافعة كهربية عكسية لا نهائية، وهو أمر لا يمكن لأي دائرة كهربية توفيره. لذا، نعتمد القيمة السابقة للتيار وننقلها مباشرةً لتكون هي القيمة عند لحظة التبديل. أما في الحالة الثانية — أي بعد مرور فترة زمنية طويلة — فيتوقف

التيار عن التغير تماماً؛ حيث ينخفض معدل التغير إلى الصفر وتتلاشى معه القوة الدافعة الكهربية العكسية، ليصبح الملف مجرد سلك عادي كأي سلك آخر. وفي الفترة الفاصلة بين هاتين الحالتين، ينتقل التيار تدريجياً من قيمة إلى أخرى، وهذا الانتقال التدريجي هو ما يمثله المنحنى المرسوم بجوار النقطة المحددة.

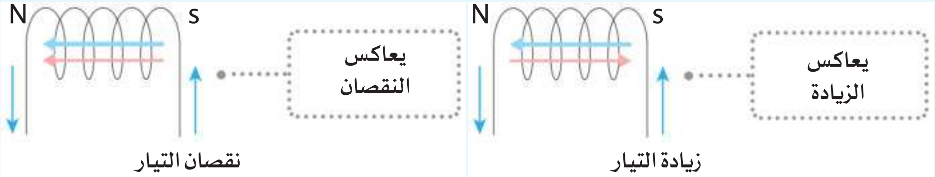
الطاقة المختزنة في الملف

لقد تطلب رفع شدة التيار إلى تلك القيمة بذل شغل في المقام الأول؛ إذ كان لا بد من دفع كل زيادة في التيار قسراً في مواجهة الجهد المعاكس الذي يولده الملف نفسه. وهذا الشغل لا يضيع على هيئة حرارة، بل يُحفظ في المجال المغناطيسي الذي أنشأه الملف، ويُسترد بمجرد تلاشي التيار؛ وهذا هو بالضبط مصدر الطاقة التي تظهر في ومضة الفصل (عند إيقاف التيار). لنحسب إجمالي الشغل المبذول أثناء تصاعد التيار من الصفر: عند لحظة معينة تكون فيها قيمة التيار i، يولد الملف جهداً معاكساً مقداره $\frac{L\Delta I}{\Delta t}$، وبالتالي فإن دفع الزيادة التالية Δi خلال ذلك الزمن يتطلب شغلاً مقداره $Li\Delta i$؛ وهي تكلفة غير ثابتة، بل تتزايد طردياً مع قيمة التيار القائم بالفعل. وإذا رسمنا بيانياً هذه المقاومة (الجهد المعاكس) مقابل التيار، نحصل على خط مستقيم ينطلق من نقطة الأصل ويصل إلى القيمة LI عند بلوغ التيار النهائي I؛ ويكون الشغل المبذول مساوياً للمساحة الواقعة تحت هذا الخط، وهي مساحة مثلث قاعدته I وارتفاعه LI. ومن ثم، فإن الطاقة المخزنة تساوي $\frac{1}{2}LI^2$. إن المعامل $\frac{1}{2}$ ليس مجرد رقم يُحفظ، بل هو يمثل متوسط قيمة الجهد المعاكس الذي بدأ من الصفر وانتهى عند القيمة LI.

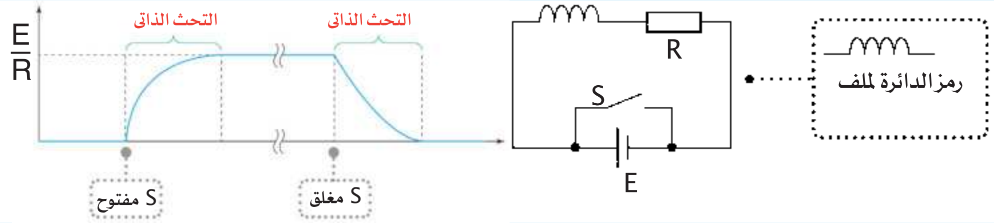
النقطة

! تُسمى الظاهرة التي تتولّد فيها قوة دافعة كهربية مستحثة في ملف في اتجاه يعارض تغيّر التيار عندما يتغيّر التيار المار في الملف إلى ΔI بعد زمن قدره Δt ثانية بالحثّ الذاتي. ومقدار القوة الدافعة الكهربية المستحثة عندئذ (V) هو: $\varepsilon=\left|\frac{-L\Delta I}{\Delta t}\right|$

ويُسمى ثابت التناسب L هذا معامل الحثّ الذاتي، ووحدته الهنري (رمزها H).



! مفهوم دوائر التيار المستمر المتضمّنة ملفات مباشرة بعد تشغيل المفتاح... يكون التيار المار هو نفسه قبل التشغيل. وبعد مرور زمن كافٍ على تشغيل المفتاح... يمكن اعتبار الملف سلكًا موصّلًا.



مثال: مباشرة بعد فتح المفتاح S : I = 0 (كما مباشرة قبل الفتح). وبعد مرور زمن كافٍ على فتح المفتاح S : I = Ɛ/R (باعتبار الملف سلكًا موصّلًا). ومباشرة بعد إغلاق المفتاح S : I = Ɛ/R (كما مباشرة قبل الإغلاق).

! عندما يمر تيار [A] I في ملف حثه الذاتى [H]L، تكون الطاقة [J] U المختزّنة في الملف $U=\frac{1}{2}LI^2$

مصطلح:

فيما يتعلق بالحث الذاتي، يتعامل النموذج مع المعامل L باعتباره خاصية ثابتة للملف، وهو افتراض دقيق بما يكفي للملفات ذات القلب الهوائي. أما الملف ذو القلب الحديدي فالأمر يختلف؛ إذ عند تجاوز قيمة معينة للتيار، يصل القلب إلى حالة التشبع، وتنخفض قيمة L، وتتوقف القوة الدافعة الكهربائية العكسية عن مواكبة معدل التغير وفق علاقة خطية؛ ومن ثم، تصبح القيمة المذكورة في ورقة البيانات صالحة فقط عند مستويات التيار التي تقل عن تلك القيمة الحدية.

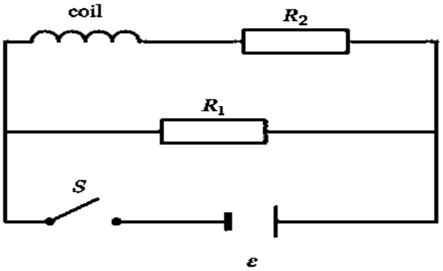
ملاحظة عملية:

يسري مبدأ الاستمرارية على الفرع الذي يحتوي على الملف، دون غيره؛ إذ قد يتغير تيار فرع آخر (يحتوي على مقاومة) في اللحظة التي يتحرك فيها المفتاح. وتعني عبارة "مدة كافية" مدةً طويلة مقارنةً بالزمن اللازم لاستقرار هذه الدائرة تحديداً؛ وهو زمنٌ قد يكون -في حالة الملف الكبير والمقاومة الصغيرة- أطول بكثير مما يوحي به النظر.

صندوق المعادلات:

القوة الدافعة المستحثة:	$\varepsilon = \left\lvert\frac{-L\,\Delta I}{\Delta t}\right\rvert$ (الوحدة: V؛ L بالهنري $\frac{\Delta I}{\Delta t}$، [H] معدّل تغيّر التيار)
الطاقة المختزَنة:	$U = \frac{1}{2} LI^2$ (الوحدة: J)
قواعد الملف في التيار المستمر: مباشرة بعد التبديل: I دون تغيّر ⟵ بعد زمن طويل: الملف = سلك موصّل ($\varepsilon_L = 0$)	

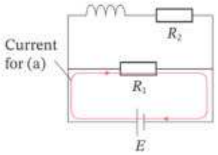
مثال محلول:



شكل (4.5.4)

بطارية قوتها الدافعة ε: المقاومة R_1 تجلس مباشرة عبر البطارية، بينما تكوّن المقاومة R_2 على التوالي مع الملف فرعًا ثانيًا؛ والمفتاح S في خط التغذية.

الموقف:	كما في الشكل، تُوصَل بطارية قوتها الدافعة الكهربية ε [V]، ومقاومتان قيمتاهما R_1 وR_2 [Ω]، وملف، ومفتاح. وللحالتين التاليتين، أوجد مقدار القوة الدافعة الكهربية المستحثة ε_L [V] المتولّدة في الملف والتيار [A] I المار في المقاومة R_1. (أ) مباشرة بعد إغلاق المفتاح. (ب) بعد مرور زمن كافٍ على إغلاق المفتاح.
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** الدائرة: R_1 موصولة مباشرة عبر البطارية ε؛ والملف وR_2 يكوّنان فرعًا ثانيًا عبر البطارية. **المطلوب:** في كل حالة: القوة الدافعة المستحثة ε_L عبر الملف والتيار I خلال R_1.
التمثيل:	انظر الشكل 4-5-4: البطارية ε، والمقاومة R_1 عبر البطارية، والمقاومة R_2 على التوالي مع الملف في الفرع الآخر، والمفتاح S. ويتتبّع الشكل 5-5-4 التيار الذي يجيب عن (a).
الاستراتيجية:	طبّق قاعدتَي الملف في التيار المستمر. فمباشرة بعد إغلاق المفتاح، يحتفظ الملف بالتيار الذي كان يحمله قبلُ (صفر)، فلا يمر تيار في فرع R_2–الملف وتظهر القوة الدافعة الكاملة للبطارية عبر الملف. وبعد زمن طويل، يكون التيار ثابتًا، فيسلك الملف سلوك سلك عادي وتكون قوته الدافعة المستحثة صفرًا. وفي الحالتين تجلس R_1 مباشرة عبر البطارية، فيكون التيار خلالها ε/R_1.



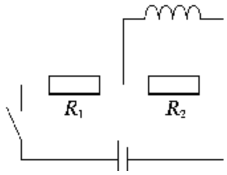
شكل (5.5.4)

المثال المحلول (a): مباشرة بعد إغلاق المفتاح لا يحمل فرع الملف شيئًا، فيكون الدوران كله هو الحلقة المرسومة بالأحمر – البطارية و R_1 والعودة.

الحل الموضح:	(أ) مباشرة بعد الإغلاق. كان التيار في الملف صفرًا ولا يستطيع القفز، فلا يحمل فرع الملف تيارًا ولا يوجد هبوط عبر R_2؛ وتظهر القوة الدافعة الكاملة للبطارية عبر الملف: $\mathcal{E}_L = \mathcal{E}$ [V]. وبما أن R_1 مباشرة عبر البطارية، يكون التيار خلالها $I = \mathcal{E}/R_1$ [A]. (ب) بعد زمن طويل. التيار ثابت، إذن $\Delta I/\Delta t = 0$ والملف سلك عادي: $\mathcal{E}_L = 0$ V. وR_1 ما زالت مباشرة عبر البطارية، إذن $I = \mathcal{E}/R_1$ [A].
منطقية الحل:	كلا الحدّين معقول: ففي اللحظة الأولى يسدّ الملف فرعه ويسلك سلوك فجوة مفتوحة، فلا بد أن يحمل القوة الدافعة الكاملة؛ وبعدها بزمن طويل لا يقدّم أي معارضة ولا يُسقِط أي فرق جهد. والتيار في R_1 لا يعتمد أبدًا على فرع الملف لأن R_1 موصولة مباشرة عبر البطارية.
فسِّرها بنفسك:	في جملة واحدة، فسِّر لماذا تكون القوة الدافعة المستحثة عبر الملف أكبر ما تكون في اللحظة الأولى بعد إغلاق المفتاح وتهبط إلى الصفر لاحقًا.

حاول بنفسك: يمر تيار مقداره 0.40 A في ملف حثه الذاتي 5.0 H. أوجد الطاقة المخزَّنة في الملف بالجول.

حاول:



شكل (6.5.4)

جرِّب 1: البطارية ε، والمقاومتان R_1 وR_2، والملف، والمفتاح، موصولة كما وُصِف.

١ كما في الشكل، تُوصَل بطارية قوتها الدافعة الكهربية $\mathcal{E}$ [V]، ومقاومتان قيمتاهما R_1 وR_2 [Ω]، وملف، ومفتاح. وللحالتين التاليتين، أوجد مقدار القوة الدافعة الكهربية المستحثة $\mathcal{E}_L$ [V] المتولّدة في الملف والتيار I [A] المار في المقاومة R_1. (i) مباشرة بعد إغلاق المفتاح. (ii) بعد مرور زمن كافٍ على إغلاق المفتاح.

٢ ازداد التيار المار في ملف حثه الذاتي 10 H من 0.20 A إلى 0.30 A. بكم جول ازدادت الطاقة المخزَّنة في الملف؟

في سياق جديد

يستخدم محرك البنزين هذا الأثر عن قصد. فملف إشعاله يحمل تيارًا ثابتًا في ملفّ ابتدائي؛ وعندما يقطع تلامسٌ ذلك التيار فجأة، تصير $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ هائلة، فتقفز القوة الدافعة الذاتية الاستحثاث $\mathcal{E}_L = \left|\frac{L\,\Delta I}{\Delta t}\right|$ عبر تلك اللفّة إلى عدة مئات من الفولتات. والملف ملفوف محوّلًا، بلفات في ثانويّه أكثر بكثير من ابتدائيّه، فيستحثّ المجالُ المنهار هناك عشرات الآلاف من الفولتات — كافيةً لقفز شرارة عبر شمعة الإشعال وإشعال الوقود. فالأثر الذي يقطع شرارة عبر مفتاح ينفتح يُسخَّر إذن، ثم يُرفَع، لتشغيل المحرك.

دورك الآن: في ملف حثه الذاتي 8.0 H، يُقطَع تيار مقداره 3.0 A إلى الصفر في 1.0×10^{-3} s. أوجد مقدار القوة الدافعة المستحثة بالفولت.

طبيعة العلم

من الأصل — طفرات الصواعق والحث الذاتي. أثناء ضربة صاعقة، يمكن أن يمر تيار كبير مفاجئ (طفرة صاعقة) في خطوط القدرة. فيحدث عندئذ حث ذاتي في الملفات داخل الأجهزة المنزلية ويمكن أن يولّد قوة دافعة عكسية هائلة تبلغ آلاف الفولتات. ولأن هذه الفرق جهد العالية قد تدمّر دوائر الأجهزة الإلكترونية كالحواسيب، يحترس المهندسون منها باستخدام مشترَكات كهربية مزوّدة بواقيات طفرات.

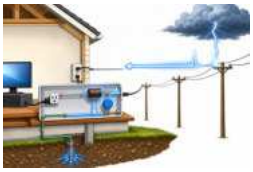
وهنا يفسّر القانون نفسه أثرًا مرغوبًا (شرارة إشعال) وخطرًا غير مرغوب (طفرة تُتلِف حاسوبًا). وإدراك أن علاقة واحدة، $\mathcal{E}_L = \left| \frac{L\,\Delta I}{\Delta t} \right|$، تحكم ملفًا مخبريًا ومحرك سيارة وطفرة صاعقة هو كيف يحوّل الفيزيائيون مبدأً واحدًا إلى جهاز ووقاية معًا.

وقد أبلغ جوزيف هنري عن هذا الأثر وفسّره تفسيرًا صحيحًا في يوليو 1832، عاملًا في أمريكا مستقلًّا عن فاراداي في لندن، وتحمل وحدة الحث اسمه لأجله. فقد يبلغ شخصان النتيجة نفسها منفصلَين، وتُحسَم الأسبقية بالسجل لا بالسمعة.

دورك الآن: اقترح خاصية تصميمية واحدة في واقي الطفرات يمكن اختبارها للتحقق مما إذا كان يحدّ فعلًا من القوة الدافعة العكسية الواصلة إلى حاسوب موصول.

شكل (7.5.4)

ملف إشعال سيارة مقطوع، بلفات ابتدائية سميكة قليلة فوق لفات ثانوية دقيقة كثيرة على قلب حديدي، يرسل فرق جهد عالية عبر سلك معزول واحد إلى شمعة إشعال، حيث تقفز شرارة زرقاء بيضاء فجوة القطبين.



شكل (8.5.4) طفرة صاعقة تنتقل عبر خط القدرة إلى منزل ؛ ويقف مشترَك بواقي طفرات بين المقبس والحاسوب، بينما يبني الملف داخل الجهاز قوة دافعة عكسية كبيرة.

سؤال الدرس، وإجابته:

يقاوم الملف أي تغيّر في تياره الخاص: فعندما يحاول التيار أن يتغيّر، يستحثّ الملف قوة دافعة $\mathcal{E}_L = \left| \frac{L\,\Delta I}{\Delta t} \right|$ تعارض التغيّر. وقطع التيار سريعًا يجعل $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ هائلة، فتكون القوة الدافعة المستحثة كبيرة جدًا — كبيرة بما يكفي لإبقاء التيار ساريًا لحظةً ولإحداث شرارة عبر التلامسات المنفتحة. ولهذا لا يتوقف التيار في ملف فورًا.

تمرين:

١) ازداد التيار المار في ملف حثه الذاتي 10 H بمقدار 0.60 A بمعدل ثابت في 0.20 ثانية. أوجد مقدار القوة الدافعة الكهربية المستحثة المتولّدة في الملف بالفولت.

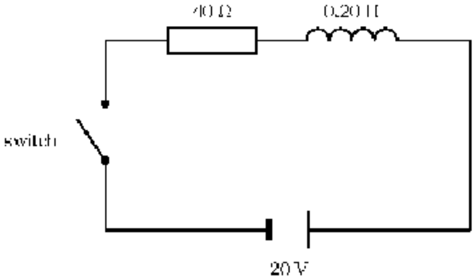
٢) عندما ازداد التيار المار في ملف بمعدل 2.0 A في الثانية، تولّدت في الملف قوة دافعة كهربية مستحثة مقدارها 5.0 V. أوجد الحث الذاتي للملف بالهنري.

٣) كما في الشكل، تُوصَل بطارية قوتها الدافعة الكهربية 20 V، ومقاومة قيمتها 40 Ω، وملف حثه الذاتي 0.20 H، ومفتاح.

(i) أوجد التيار المار في الدائرة مباشرة بعد إغلاق المفتاح بالأمبير.

(ii) بعد مرور زمن كافٍ على إغلاق المفتاح، أوجد التيار المار في الدائرة بالأمبير.

(iii) عند الحالة (ii)، أوجد الطاقة المخزَّنة في الملف بالجول.



شكل (9.5.4) تمرين 3: بطارية 20V ومقاومة 40 Ω وملف 0.20 H ومفتاح، موصولة في دائرة واحدة.

الفصل الخامس

الطبيعة الكمية للضوء والمادة

1-5 الطبيعة الجسيمية للضوء

2-5 الأشعة السينية

3-5 موجات المادة

٥-١ — الطبيعة الجسيمية للضوء

؟ سؤال الدرس:

ما الظواهر التي يمكن تفسيرها إذا اعتبرنا أن الضوء مجموعةً من الجسيمات وليس موجةً؟

ستتعلم أن:

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تحسب** مقدار الطاقة التي تحملها حزمة ضوء واحدة، انطلاقًا من لون الضوء (تردد الضوء) أو من طوله الموجي.

٢. **تتنبّأ** بما يحدث لمعدن معين تعند تسليط ضوء مصباح معين: هل تغادره شحنة (هل تنبعث منه شحنة نتيجة سقوط ضوء المصباح) أصلًا، وما هى السرعة القصوى للإلكترونات، وما الذي يتغيّر إذا جُعل المصباح أكثر سطوعًا (شدة ضوء المصباح وليس لونه) بدلًا من أن يُجعل أزرق (لون ضوء المصباح وليس شدته).

٣. **تقيس** ثابتين من خط تجريبي واحد — ثابتًا عام للضوء ويحدد من ميل الخط البيانى وآخر خاصًّا بالمعدن من موضع قطعه للمحورين.

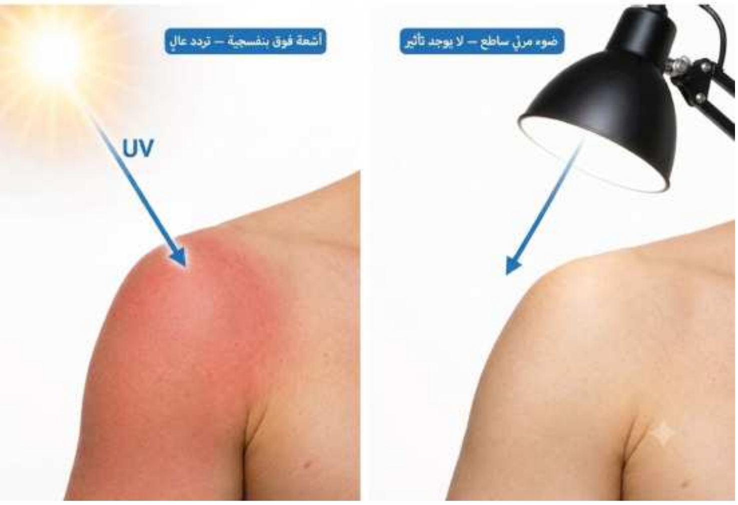
فكرة أساسية

الفوتون:

حزمة منفردة غيرقابلة للتجزئة التي يُنقل بها الضوء. ما الذي يحدد طاقته: لون الضوء أم سطوعه؟

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر

قضاء ظهيرة كاملة تحت مصباح داخلي ساطع لا يحرق جلدك أبدًا، في حين أن فترة قصيرة في الشمس قد تحرقه — لأن ضوء الشمس يحمل أيضًا أشعة فوق بنفسجية. وزيادة سطوع المصباح أكثر لا تفعل شيئًا، بينما تؤذي الأشعة فوق البنفسجية عالية التردد الجلدَ حتى بكميات أصغر بكثير. فما يستطيع شعاع الضوء فعله يبدو متوقفًا على لونه (تردده) لا على شدة سطوعه — وهو الدليل الأول على أن الضوء ينقل طاقته في حزم ثابتة.


أشعة فوق بنفسجية – تردد عالٍ
ضوء مرئي ساطع – لا يوجد تأثير
UV

شكل 5-1-1: مصباح عادي ساطع يترك الجلد سليمًا، بينما تحرقه أشعة فوق بنفسجية أضعف بكثير — دليل على أن أثر الضوء يحدده تردده (لونه) لا سطوعه.

تنبأ:

(أ) إذا جعلت المصباح المرئي العادي أكثر سطوعًا، فهل يبدأ في إيذاء الجلد كما يفعل قليل من الأشعة فوق البنفسجية؟

(ب) إذا كان الأثر يحدده التردد لا السطوع، فهل يغيّر تقليل شدة مصدر الاشعة فوق البنفسجية (فوتونات أقل) الطاقةَ التي ينقلها كل فوتون مفرد؟

استكشف — اللون أم السطوع: ما الذي يفرّغ الصفيحة؟

ما ستفعله: تشحن كشافًا كهربيًا (الالكتروسكوب) ذا صفيحة زنك، ثم تختبر ضوءًا مرشّحًا متصاعد (متزايد) اللون (التردد) عند مستويات سطوع مختلفة لتجد ما الذي يُسقِط الورقة فعلًا.

الزمن: 15 دقيقة.

ما تحتاجه (الأدوات):

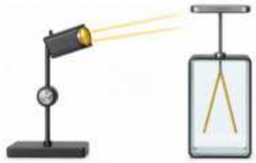
- كشاف كهربي ذو ورقة ذهبية وصفيحة زنك نظيفة.
- مصباح على حامل قابل للضبط مع متحكّم في السطوع.
- مجموعة مرشّحات ألوان (أحمر ← بنفسجي) ومصدر فوق بنفسجي.
- قضيب مشحون لإعطاء الصفيحة شحنة سالبة.

قضيب مشحون

مرشح ملون (واحد من مجموعة)

مصباح على حامل

كشاف كهربائي



شكل 5-1-2: • مصباح على حامل بمتحكّم في السطوع ومصدر مرئي/فوق بنفسجي قابل للتبديل، موجَّه إلى صفيحة الزنك في كشاف كهربي ذي ورقة ذهبية.

الخطوات:

① اشحن صفيحة الزنك شحنة سالبة بالقضيب المشحون حتى ترتفع الورقة الذهبية، وسجّل زاوية الورقة.

② ركّب المرشّح الأحمر، ووجّه المصباح نحو الصفيحة، وارفع السطوع على خطوات — وسجّل في العمود الأخير ما إذا كانت الورقة تسقط ام لا.

③ بدّل المرشّحات باتجاه البنفسجي وأخيرًا إلى المصدر فوق البنفسجي؛ ولكل لون، نازلًا في الجدول من التردد المنخفض إلى المرتفع، لاحظ ما إذا كانت الصفيحة تُفرَّغ.

④ لأول لون يفرّغ الصفيحة، قلل سطوع المصباح وتحقّق مما إذا كانت الورقة ما زالت تسقط.

المحاولة	لون المرشّح (التردد ν متصاعد)	سطوع المصباح	هل تُفرَّغ الورقة؟ (نعم/لا)
١			
٢			
٣			

حلّل ما جمعته:

(أ) بقراءة العمود نزولًا من الأحمر إلى فوق البنفسجي، أين تبدأ الورقة في السقوط أول مرة — وهل يفرّغ رفعُ لونٍ فاشلٍ (لم يستطيع اسقاط الورقة) إلى أقصى درجة سطوع إلى تفريغ اللوحة؟

(ب) أي خاصية واحدة من خواص الضوء تقرر ما إذا كانت الشحنة تغادر المعدن؟ وفسّر لماذا يناقض هذا الفكرة الموجية القائلة إن شعاعًا أسطع، يحمل طاقة أكبر، ينبغي أن يحرّر الشحنة دائمًا.

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

ملاحظة عملية

سقوط الورقة يعني أن شحنة تغادر الصفيحة — راقب الورقة لا المصباح. وأبقِ الصفيحة على نفس المسافة من المصباح في كل محاولة، بحيث يتغيّر فقط اللون والسطوع بين الصفوف.

من الملاحظة إلى النموذج

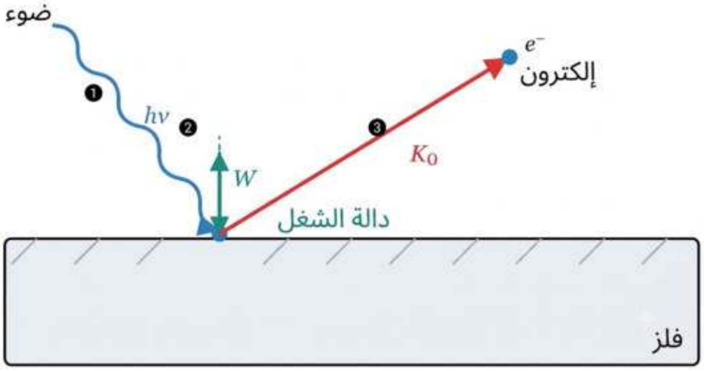
الضوء مجموعة هائلة (تيارًا) من الفوتونات

لماذا يجب أن يصل الضوء في حزم أصلًا؟ نتيجة الاستكشاف (التجربة) هي المفتاح. فمهما زاد سطوع المصباح الأحمر لا تسقط الورقة أبدًا، بينما يفرّغ مصدرٌ فوق بنفسجي سطوعه خافت (شدته ضعيفة) الصفيحةَ فورًا. والموجة تنشر طاقتها بانسياب عبر الصفيحة كلها، فينبغي لموجة أقوى أن تغلب في النهاية دائمًا ولا ينبغي أن يكون للون شأن؛ لكن القياس يقول العكس. ولا يستقيم ذلك إلا إذا كان الشعاع ينقل طاقته في حزم غير قابلة للتجزئة يحدد حجمَها اللونُ — فزيادة إضاءة المصباح ترسل

المزيد من الحزم، وليس حزمًا أكبر أبدًا.. وقياس كيف ينمو حجم الحزمة مع اللون يعطي تناسبًا مستقيمًا، والثابت الذي يحدد مقياسه يظهر نفسه لكل معدن وكل لون تم تجربته على الإطلاق، وهو ما يجعله ثابتاً من ثوابت الطبيعة بدلاً من أن يكون خاصية للمصباح.

التأثير الكهروضوئي

لا شيء في الصورة الموجية يمنع بداية بطيئة: فالموجة الضعيفة ينبغي ببساطة أن تحتاج زمنًا أطول لتجميع طاقة كافية عند بقعة واحدة. لكن «منضدة الاختبار» ترفض ذلك أيضًا. فدون لون معيّن يكون التيار صفرًا تمامًا مهما طال الانتظار ومهما كان سطوع المصباح، وفوقه يظهر التيار دون أي تأخير قابل للقياس حتى حين يكون الضوء خافتًا لدرجة أن الموجةً كانت ستحتاج ساعات لتجميع الطاقة. وبالتالي مقياسان (مفتاحان) مستقلان يعملان أحدهما يقرر هل يخرج إلكترون وبأي سرعة يغادر، والآخر يقرر فقط عدد الإلكترونات التي تخرج. وذلك الفصل غير ممكن إلا إذا تعاملت حزمة واحدة مع إلكترون واحد.



شكل 5-1-3• آلية الفوتون في ثلاث مراحل: ❶ يمتصّ إلكترون مفرد فوتونًا طاقته hν؛ ❷ يدفع الإلكترون دالة الشغل Φ ليفلت من المعدن؛ ❸ يغادر الباقي طاقةً حركية عظمى K_o.

تتبّع الطاقة خلال عملية واحدة.:- تصل الحزمة حاملةً hγ؛ والتخلّص من السطح يكلّف قيمة ثابتة (دالة الشغل) Φ تخصّ المعدن؛ وما يتبقى من الطاقة يظهر فى صورة طاقةً حركية. والإلكترونات الاكثر ارتباطًا (أعمق) تحتاج إلى طاقة أكبر (زيادةً) للخروج، فالفرق يمثل الحد الأقصى (السقف) لا قيمةٌ مشتركة — وهذا ما يسجّله في K_o. واقرأ الآن ذلك الحد الأقصى فى معادلةَ خط مستقيم في المتغيّر ν: صورته ، فتمثيل طاقة الإلكترون مقابل التردد لا بد أن يعطي خطًا مستقيمًا ميله h يقطع محور الطاقة عند -Φ.

ثم تظهر ثابتان ذوا طابعين مختلفين تمامًا من الرسم البياني الواحد: الميل يعطي h، وهو ثابت لكل معدن، بينما نقطة التقاطع تعطي Φ، وهي مختلفة لكل معدن. يقطع الخط محور التردد حيث تكون الحزمة كبيرة بما يكفي لدفع الرسوم فقط (الحد الأدنى من الطاقة) ولا أكثر، $h\gamma = \Phi$، لذا:

$$\gamma_o = \frac{\Phi}{h}$$

— تحت تلك النقطة ستعطي المعادلة طاقة حركية سالبة، وهي طريقة الطبيعة في القول بأنه لاتنبعث الكترونات (لايخرج شيء) على الإطلاق.

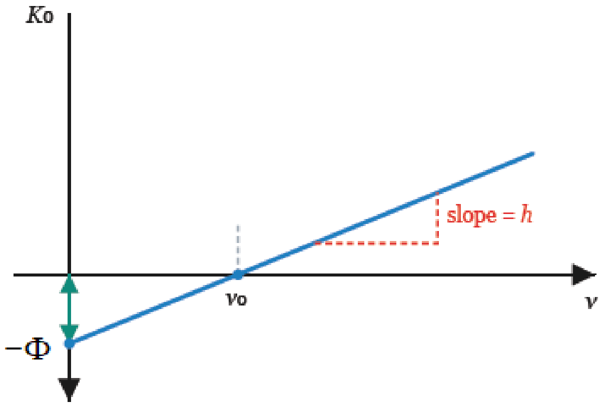
⭐ حقيقة أساسية

المقياس:

– ثابت بلانك من أصغر الأعداد في الفيزياء، فحزمة واحدة من الضوء المرئي ضئيلة: المثال المحلول أدناه يقدّر فوتونًا واحدًا بـ 6.0×10^{-19} J. والضوء العادي ينقل من الحزم في الثانية عددًا كبيرًا إلى حدّ أن الفوتون لا يمكن رؤيته قط، ولهذا خدمت الصورة الموجية قرنين قبل أن يقوم أي شخص بفحص سطح معدني واحد عن كثب (قرب).

⭐ ملاحظة

انتبه: «ضوء أقوى» و«ضوء أعلى ترددًا» تغييران مختلفان، والأسئلة تخلطهما عمدًا؛ فاقرأ أيّهما مثبَّت قبل أن تجيب.



شكل 5-1-4 ٠الطاقة الحركية العظمى K_o مقابل التردد ν: خط مستقيم ميله h يلاقي محور K_o عند المقطع −Φ ويعبر محور ν عند التردد الحرج ν_o.

مصطلح

حيث يتوقف النموذج — Φ خاصية لسطح المعدن، لا للضوء أبدًا، فلا يستطيع أي ضبط للمصباح إزاحتها، بينما تزيحها كثيرًا طبقةُ أكسيد أو بصمةُ إصبع على الصفيحة. والمعادلة الكهروضوئية تعطي الحد الأقصى لا سرعة كل إلكترون: فلا يبلغه إلا الإلكترونات المحرَّرة عند السطح تمامًا.

الخلاصة

فرضية الفوتون

- الضوء تيار من الجسيمات. ويُسمى هذا الجسيم فوتونًا (كمّ ضوء). وتُحدَّد شدة الضوء بتردده وعدد الفوتونات.

- طاقة الفوتون الواحد [j] E تتناسب مع تردد الضوء [Hz] hν، ويُعبَّر عنها بالصيغة:
$E = h\nu$، حيث h ثابت يُسمى **ثابت بلانك**، $h \approx 6.63 \times 10^{-34}$ J·s.

تُسمى الظاهرة التي تنبعث فيها إلكترونات من معدن عندما يسقط الضوء على سطحه التأثير الكهروضوئي. وتُسمى هذه الإلكترونات المنبعثة الإلكترونات الكهروضوئية. ولا يحدث التأثير الكهروضوئي إذا كان تردد الضوء الساقط أقل من التردد الحرج. وعند زيادة تردد الضوء، تزداد الطاقة الحركية للإلكترونات الكهروضوئية. وعند زيادة شدة الضوء (زيادة عدد الفوتونات)، يزداد عدد الإلكترونات الكهروضوئية. (ولا تتغيّر الطاقة الحركية للإلكترونات الكهروضوئية.)

تفسير التأثير الكهروضوئي بفرضية الفوتون:

❶ يعطي فوتون واحد طاقته hγ طاقةً لإلكترون واحد في المعدن.

❷ يقفز الإلكترون الذي اكتسب الطاقة خارج المعدن (ويسمى الحد الأدنى اللازم لتحرير الكترون خارج المعدن، Φ، بدالةَ الشغل).

❸ الباقي بعد طرح دالة الشغل من طاقة الفوتون يكون الطاقة الحركية العظمى K_o للإلكترون:
$K_o = h\nu - \Phi$

التمثيل البياني لتردد الضوء ν والطاقة الحركية العظمى للإلكترونات K_o

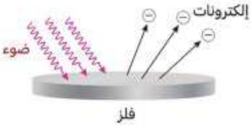
ميل الخط المستقيم h: ثابت بلانك.

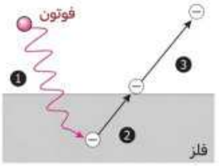
مقطع الخط المستقيم −Φ: دالة الشغل Φ.

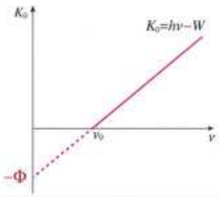
تقاطع الخط مع محور hν عند $h\nu_o$: حيث $h\nu_o$ التردد الحرج.

وعندما $h\nu_o > h\nu$ لا تنبعث إلكترونات؛

وعندما $h\nu_o < h\nu$ تنبعث الإلكترونات.







صندوق المعادلات:

طاقة الفوتون:	$E=h\nu\ (h\approx 6.63\times10^{-34}\ J\cdot s)$؛ وبدلالة الطول الموجي $E=\frac{hc}{\lambda}$، حيث الطول الموجى λ يتعين من العلاقة $\lambda=\frac{c}{h\nu}$
المعادلة الكهروضوئية:	$K_o=h\gamma-\Phi$ (K_o هى الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الكهروضوئية؛ Φ دالة الشغل)
التمثيل البياني لـ K_o مقابل ν:	الميل = h المقطع = $-\Phi$ عبور محور $h\nu_o=h\gamma$، مع $\Phi=h\nu_o$
العتبة:	$\Phi=h\nu_o$

مثال محلول:

الموقف:	يسقط ضوء طوله الموجي $3.3\times10^{-7}\ m$ على معدن دالة شغله $3.7\times10^{-19}\ J$. أجب لأقرب رقمين عشريين، بفرض أن ثابت بلانك $6.6\times10^{-34}\ J\cdot s$ وسرعة الضوء $3.0\times10^{8}\ m/s$. (أ) أوجد طاقة E لفوتون واحد من هذا الضوء بالجول. (ب) أوجد الطاقة الحركية العظمى K_o للإلكترونات الكهروضوئية المنبعثة من سطح المعدن بالجول. (جـ) إذا بقيت شدة الضوء ثابتة وقُصِّر الطول الموجي فقط، صِف كيف تتغيّر الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الكهروضوئية.
المعطيات والمطلوب:	$\lambda=3.3\times10^{-7}\ m$، $\Phi=3.7\times10^{-19}\ J$، $h=6.6\times10^{-34}\ J\cdot s$، $c=3.0\times10^{8}\ m/s$. أوجد: (أ) طاقة الفوتون E (ب) الطاقة الحركية العظمى K_o (جـ) كيف تستجيب K_o لطول موجي أقصر.
التمثيل:	انظر الشكل 3-1-5 لانتقال الطاقة بين الفوتون والإلكترون: يمدّ الفوتون $E=h\nu$، وتُدفَع دالة الشغل Φ للإفلات، والباقي هو K_o.
الاستراتيجية:	عبِّر عن التردد بدلالة الطول الموجي والسرعة $=c/x$ واستخدم $E=h\nu$ للحصول على طاقة الفوتون. ثم اطرح دالة الشغل من طاقة الفوتون. وللجزء (c)، استخدم $C=\lambda.\gamma$ لترى كيف يتغيّر التردد، ومن ثمّ طاقة الإلكترون، مع نقصان λ. $E=h\gamma=(h\ c)/\lambda$

الحل الموضح:	(أ) التردد من الطول الموجي، $\gamma = c/\lambda = 3.0\times10^{8} / 3.3\times10^{-7}$، ثم $E = h\nu$: $E = (6.6\times10^{-34})\times(3.0\times10^{8} / 3.3\times10^{-7}) = 6.0\times10^{-19}\,\text{J}$. (ب) اطرح دالة الشغل من طاقة الفوتون: $K_o = (6.0\times10^{-19}) - (3.7\times10^{-19}) = 2.3\times10^{-19}\,\text{J}$. (جـ) كلما قصر الطول الموجي كبر التردد، فتكبر الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الكهروضوئية.
منطقية الحل:	طاقة الفوتون $6.0\times10^{-19}\,\text{J}$ أكبر من دالة الشغل $3.7\times10^{-19}\,\text{J}$، فيحدث الانبعاث فعلًا، والباقي $K_o = 2.3\times10^{-19}\,\text{J}$ موجب وأصغر من طاقة الفوتون — تمامًا كما تقتضي $K_o = h\gamma - \Phi$.
فسِّرها بنفسك:	في جملة واحدة، قل لماذا زيادة سطوع (شدة) نفس الضوء (دون تغيير طوله الموجي) لا تُغير أقصى طاقة حركة للإلكترونات الكهروضوئية.

حاول بنفسك: يسقط ضوء طوله الموجي $6.6\times10^{-7}\,\text{m}$ على معدن دالة شغله $2.0\times10^{-19}\,\text{J}$ ($h = 6.6\times10^{-34}\,\text{J·s}$، $c = 3.0\times10^{8}\,\text{m/s}$)، لأقرب رقمين عشريين.

أوجد طاقة الفوتون E والطاقة الحركية العظمى K_o

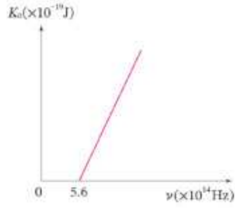
حاول:

١. أوجد ما يلي لأقرب رقمين عشريين. عندما يسقط ضوء تردده $5.0\times10^{14}\,\text{Hz}$ على معدن دالة شغله $3.0\times10^{-19}\,\text{J}$، يحدث التأثير الكهروضوئي. أوجد الطاقة الحركية العظمى K_o للإلكترونات الكهروضوئية المنبعثة من سطح المعدن بالجول. افترض أن ثابت بلانك $6.6\times10^{-34}\,\text{J·s}$.

٢. عندما أُسقِط ضوء بترددات مختلفة على معدن معيّن، كانت العلاقة بين تردد الضوء $\nu[\text{Hz}]$ والطاقة الحركية العظمى $K_o\,[\text{J}]$ للإلكترونات الكهروضوئية كما في الشكل 5-1-5. أوجد دالة شغل هذا المعدن بالجول. افترض أن ثابت بلانك $6.6\times10^{-34}\,\text{J·s}$.

في سياق جديد

تعتمد أجهزة استشعار الضوء في كل مكان على الآلية نفسها: يدخل الفوتون ويخرج الإلكترون. فالكاشف الضوئي المضاعِف المستخدم في أجهزة الكشف عن الإشعاع، ومقياس الضوء في الكاميرا، وشعاع فتح الأبواب الأوتوماتيكية، والصمام الثنائي الضوئي في قارئ الباركود، كلها تعتمد على ضوء ذي تردد مرتفع بدرجة كافية لتحرير شحنة من سطح أو عبر وصلة. وبما أن التردد المرتفع فقط (وليس السطوع) هو القادر على تحرير إلكترون والتغلب على دالة الشغل، فإن كل جهاز يُصنع من مادة لها تردد حرج يتوافق مع الضوء الذي يجب أن يستشعره الجهاز.



شكل 5-1-5: • جرِّب: أكبر طاقة للإلكترونات الضوئية ممثَّلة مقابل تردد الضوء؛ ويلاقي الخط محور التردد عند $5.6\times10^{14}\,\text{Hz}$.

دورك الآن: معدن دالة شغله $2.0\times10^{-19}\,\text{J}$. أوجد التردد الحرج ν_o الذي لا تنبعث دونه إلكترونات كهروضوئية ($h = 6.6\times10^{-34}\,\text{J·s}$، رقمان معنويان).

طبيعة العلم:

من الأصل — الخلايا الشمسية والتأثير الكهروضوئي. تطبّق الخلايا الشمسية المستخدَمة في الآلات الحاسبة والألواح الشمسية على الأسطح الأثرَ الكهروضوئي الجهدي. فعندما تصطدم جسيمات الضوء (الفوتونات) بشبه موصّل وتقذف إلكترونات، تتحوّل طاقة الضوء مباشرة إلى طاقة كهربية، مولِّدةً تيارًا كهربيًا.

وقد استحقّت فرضية الفوتون مكانها بتفسيرها ما عجز عنه النموذج الموجي بالضبط: عتبةُ تردد للانبعاث، وطاقةٌ حركية عظمى تعتمد على التردد لا على السطوع. والنموذج في الفيزياء يُبقى عليه حين يفسّر الملاحظات العنيدة التي يتركها منافسه دون تفسير، ثم يُوظَّف — هنا في تحويل ضوء الشمس تيارًا مباشرة.

شكل 5-1-6 • باب زجاجي منزلق أوتوماتيكي مزوَّد بباعث ضوء ومستقبِل كهروضوئي متقابلين أسفل الإطارين؛ يعبر شعاع رفيع مستقيم المدخل، فتقطعه ساق الشخص المقترب، فتُشير إلى اللوحين بالانزلاق.

وقد عثر هرتز على الأثر مصادفةً عام ١٨٨٧، وبيّن لينارد عام ١٩٠٢ أن اللون (التردد) لا السطوع (الشدة) هو ما يقرر مغادرة الشحنة للمعدن — نتيجة لم يستطع أي تفسير موجي استيعابها. وكان تفسير أينشتاين عام ١٩٠٥ سببَ نيله جائزة نوبل عام 1921، لا النسبية. فالشذوذ الذي يأبى الزوال هو ما يُرغِم الفيزياء على تغيير رأيها.

دورك الآن: اقترح قياسًا واحدًا على خلية كهروضوئية يتيح لعالِم أن يفصل بين الصورة الموجية والصورة الجسيمية (الكمية) للضوء.

سؤال الدرس، وإجابته:

إن اعتبار الضوء مجموعة من الجسيمات يفسر ثلاثة أمور لا يستطيع نموذج الموجة تفسيرها:

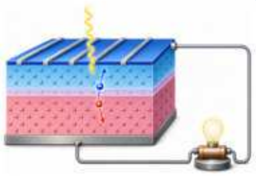
أولًا: وجود تردد حرج من الأساس؛ فالموجة، أيًّا كان لونها، ينبغي أن تحرر الشحنة في النهاية، بينما الفوتون إما أن يمتلك طاقة كافية للتغلب على حاجز سطح المعدن أو لا يمتلكها.

ثانيًا: أن سرعة الإلكترونات تعتمد على لون الضوء (تردده) ولا تعتمد على سطوعه؛ لأن كل إلكترون يتفاعل مع فوتون واحد.

ثالثًا: يبدأ انبعاث الإلكترونات فورًا حتى مع الضوء الخافت، لأنه لا توجد طاقة تحتاج إلى أن تتراكم أولًا.

إن الخط المستقيم الناتج من رسم طاقة الإلكترونات مقابل التردد يمثل الدليل الكمي على الأمور الثلاثة؛ إذ إن:

- ميل الخط يقيس ثابتًا كونيًا.
- نقطة تقاطع الخط مع محور الطاقة تقيس دالة الشغل الخاصة بالمعدن.
- نقطة تقاطع الخط مع محور التردد تحدد بداية انبعاث الإلكترونات، أي التردد الحرج.



شكل 5-1-7 • ضوء الشمس على خلية شمسية: تصطدم الفوتونات بشبه الموصّل وتقذف إلكترونات عبر الوصلة، فتقود تيارًا كهربيًا يشغّل آلة حاسبة.

تمرين:

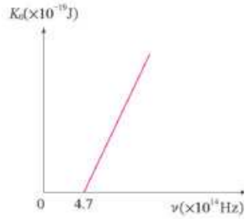
١. أوجد ما يلي لأقرب رقمين عشريين. عندما سقط ضوء طاقة فوتونه 9.0×10^{-19} J على معدن دالة شغله 6.9×10^{-19} J، حدث الأثر الكهروضوئي. ما الطاقة الحركية العظمى K_0 للإلكترونات الضوئية القافزة خارج المعدن بالجول؟

٢. أُسقِط ضوء طوله الموجي 2.2×10^{-7} m على معدن دالة شغله 4.4×10^{-19} J. افترض أن ثابت بلانك 6.6×10^{-34} J·s وسرعة الضوء 3.0×10^{8} m/s.

(i) أوجد طاقة E لفوتون واحد من هذا الضوء بالجول.

(ii) أوجد الطاقة الحركية العظمى K_0 للإلكترونات الضوئية القافزة خارج المعدن بالجول.

(iii) إذا بقي الطول الموجي ثابتًا وزادت شدة الضوء وحدها، صِف كيف تتغيّر الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الكهروضوئية.



شكل 5-1-8 • تمرين 3: الطاقة الحركية العظمى K_0 للإلكترونات الضوئية ممثَّلة مقابل تردد الضوء ν لهذا المعدن.

٣. عندما يسقط ضوء بترددات مختلفة على معدن معيّن، تكون العلاقة بين تردد الضوء ν [Hz] والطاقة الحركية العظمى K_0 [J] للإلكترونات الضوئية المنبعثة من المعدن كما في الشكل 5-1-8. أوجد دالة شغل هذا المعدن بالجول. افترض أن ثابت بلانك 6.6×10^{-34} J·s.

الدرس ٥-٢ — الأشعة السينية

سؤال الدرس:

كيف تُنتَج الأشعة السينية وهي الأشعة النافذة المستخدَمة للنظر خلال الحقائب والأجسام على السواء؟

ستتعلم أن:

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. تفسّر تولد جزأي طيف الأشعة السينية – الطيف المتصل والطيف الخطي المميز – وايهما يتغير عند تغيير فرق جهد الأنبوبة وأيّها يتغير عند تغيير معدن مادة الهدف..

٢. تحسب طاقة وكمية حركة فوتون واحد من الأشعة السينية من طوله الموجي، وتحديد اتجاه كمية الحركة.

٣. تتنبّأ بأقل طول موجي للاشعة السينية المنبعثة لذي يقطع عنده الأنبوبة من جهد التسارع (الجهد المعجل بين الفنيلة ومادة الهدف)، وتحوّل بين الجول والإلكترون فولت.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر

شكل 5-2-1 • ماسح مطار يصنع أشعة سينية بدفع إلكترونات معجَّلة إلى هدف معدني؛ وتنفذ الأشعة خلال الحقيبة لتصوير محتوياتها.

حقيقة أساسية:

الأشعة السينية:

إشعاع يُصنَع لا يُوجَد: ادفع إلكترونات خلال فرق جهد V إلى هدف معدني يعُد جزء من طاقتها أشعةً أنفذ بكثير من الضوء. فما الذي يحدد أطوالها الموجية؟

توقَّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) إذا رفعت فرق جهد التعجيل، هل يصير أقصر طول موجي للأشعة السينية المنبعثة أطول أم أقصر؟

(ب) هل تتحرك القمم الحادة عند تغيير فرق الجهد، أم فقط عند تغيير معدن الهدف؟

استكشف — قراءة طيف الأشعة السينية

ما ستفعله: تقرأ أقصر طول موجي من طيفين سينيين مقيسين أُخِذا عند فروق جهد تعجيل مختلفتين (V)، وتختبر ما إذا كان حاصل الضرب V λ_{min} يظل ثابتًا.

الزمن: 10 دقائق

ما تحتاجه (الأدوات):

- الطيفان السينيان المقيسان أدناه
- مسطرة لقراءة حدّ القطع
- آلة حاسبة

مصدر جهد عالٍ

مسطرة

الخطوات:

١ على كل منحنى متصل، حدد أين يقطع بحدّة من جهة الطول الموجي القصير؛ فنقطة اللقاء تلك مع المحور هي أقصر طول موجي λ_{min}. اقرأها لمنحنى الفرق جهد العالية ولمنحنى الفرق جهد المنخفضة..

٢ سجّل بجانب كل قراءة فرق جهد التعجيل V المطبوعة على ذلك المنحنى (50 kV أو 25 KV).

٣ احسب لكل محاولة حاصل الضرب V λ_{min} وأدخله في العمود الأخير.

٤ قارن حاصل الضرب نزولًا في العمود الأخير لتحكم على ما إذا كان V λ_{min} يبقى كما هو مع تغيّر فرق جهد التعجيل (V).

المحاولة	فرق جهد التعجيل V (kV)	أقصر طول موجي ($\lambda_{min} \times 10^{-11}$ m)	V× λ_{min}
منحنى فروق الجهد العالية			
منحنى فروق الجهد المنخفضة			

حلّل ما جمعته:

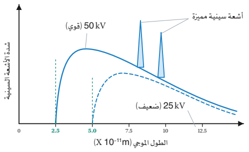
(أ) مع ارتفاع فرق جهد التعجيل V، هل يصير أقصر طول موجي λ_{min} أطول أم أقصر؟ وانظر الآن نزولًا في العمود الأخير - ماذا تلاحظ على حاصل ضرب λ_{min} × V؟

(ب) إذا كان λ_{min} × V ثابتًا، فإن $\lambda_{min} = \frac{\text{ثابت}}{V}$. عبّر عن الثابت بدلالة h وc وe، واستخدمه للتنبؤ بـ λ_{min} عند فرق جهد لم تقرأه.

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

ملاحظة عملية:

اقرأ λ_{min} حيث يلاقي منحنى متصل محورَ الطول الموجي في قطع حادّ - لا عند قمة؛ فالقمم المميَّزة العالية يثبّتها المعدن، فتجاهلها عند تحديد موضع القطع. واستخدم مقياس الطول الموجي نفسه للمنحنيين.



شكل 5-2-2 • طيفان سينيان مقيسان من الهدف المعدني نفسه: المنحنى المتصل عند 50 kV يقطع عند 2.5×10^{-11} m، والمنحنى المتقطع عند 25KV عند 5.0×10^{-11} m. وتقع القمم المميِّزة عند أطوال موجية يحددها المعدن، فلا تتغير مع الفرق جهد.

من الملاحظة إلى النموذج:

الأشعة السينية المتصلة والخطية المميّزة

تعمل آليتان مختلفتان تمامًا داخل نفس الأنبوبة هـ، ويفصل بينهما الطيف بالشكل. فالإلكترون الذي ينحرف فحسب وهو يشقّ طريقه إلى الهدف يشعّ جزءًا من طاقته؛ ويختلف المقدار من إلكترون إلى آخر، فينتج عن هذا الاشعاع طيف متصل يعرف بالاشعاع الناعم. أما الإلكترون الذي يصطدم بأحد الالكترونات القريبة من نواة ذرة هدف فيبدأ شيئًا آخر: إذ يهبط إلكترون خارجي في المكان الخالى ويشعّ فرق الطاقة الثابتة بين مستويين من مستويات تلك الذرة. والطاقة الثابتة تعني طولًا موجيًا ثابتًا، فيظهر هذا الاشعاع قممًا ضيقة مواضعُها بصمةٌ للعنصر المستخدَم — استبدل النحاس بالتنجستن يتغير الطول الموجى للطيف المميز، بينما تحتفظ الحدبة بشكلها. ولمسار الانحراف وحده حد أقصى: فالإلكترون يصل حاملًا eV من الطاقة ويستطيع أن ينقلها، على الأكثر، كلها لفوتون واحد، فيخضع أقصر طول موجي للعلاقة

$$eV = \frac{hc}{\lambda_{min}}$$

كلما زاد فرق جهد التعجيل (V) كلما قل أقل طول موجى (λ_{min})، بحيث يظل حاصل ضربهما ثابتا كما فى العمود الاخير من استكشف (التجربة)

طاقة الفوتون وكمية تحركه

علاقتا الفوتون تم تناولهما بالفعل فى الدرس 5–1 مع معادلة الموجة $c=\gamma\lambda$ ؛ والشغل هنا ليس إلا اختيار الصورة الملائمة. فالتردد هو المتغيّر الطبيعي حين تُمتصّ حزمة بواسطة إلكترون واحد، لكن أجهزة الأشعة السينية معايَرة بالطول الموجي، فحذف التردد v من العلاقتين يتيح قراءة الطاقات مباشرة من محور طول موجي — نفس الفوتون موصوفًا بطريقتين، لا فوتونين مختلفين. أما علاقة كمية التحرك فتضيف معلومة جديدة حقًا: الحزمة لا تنقل طاقة فقط بل تنقل دفعًا أيضًا. وكمية الحركة كمية متجهة بينما الطاقة ليست كذلك، لذا فإن الإجابة عن كمية الحركة p تظل غير مكتملة حتى يتم تحديد اتجاهها، وهذا الاتجاه هو ببساطة المسار الذي يسلكه الفوتون. وهذا هو السبب في أن الحزمة الممتصة تضغط على أي شيء يوقفها، والسبب في أن الثابت h يحدد كلاً من مقياس الطاقة ومقياس كمية الحركة للضوء.

الإلكترون فولت يتم اختيار الوحدات بحيث تتناسب مع القيم التي يتم التعامل معها فعليًا. وعند كتابة القيم بالجول، تقع كل طاقة في هذا الفصل بالقرب من 10^{-19} وهو نطاق يتضمن فيه كل حساب أسًّا عشريًا، ولا يمكن مقارنة رقمين معًا بنظرة سريعة. إن دفع إلكترون واحد خلال فولت واحد فر معيارًا طبيعيًّا لهذا الحجم بالضبط، لذا فإن ذكر الطاقات مضاعفاتٍ لها يزيل الأسّ بالكلية: فأنبوبة تعمل عند ثلاثين ألف فولت يعطي كل إلكترون 30 keV، رقمًا يُقرأ مباشرة من جهاز فرق الجهد دون أي تحويل. لى الإطلاق. الثمن هو أن هذا المقياس ليس وحدة من وحدات النظام الدولي — قبل إدخاله في المعادلة $E = hc/\lambda$، أو أي معادلة أخرى، يجب تحويله مرة أخرى إلى جول عن طريق ضربه في الشحنة الأولية. تعمل فيزياء النووية والجسيمات بعدة أسسًا من العشرة أعلى من ذلك، ولهذا السبب تحمل وحدتها اليومية البادئة «ميجا».

حقيقة أساسية:

المقياس:

الأشعة السينية في هذا الدرس أطوالها الموجية قرب 10^{-11} m، أي أقصر نحو عشرة آلاف مرة من الضوء الأخضر وقريبة من تباعد الذرات في بلورة. وذلك التوافق هو ما يجعل حيود الأشعة السينية الطريقةَ المعيارية لقياس بنية البلورات.

ملاحظة:

انتبه:

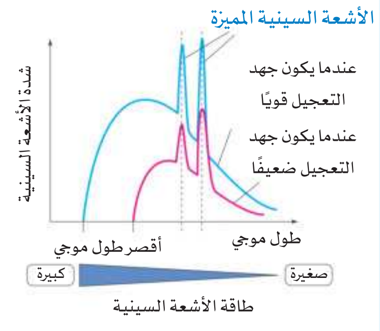
سؤال عن «الطول الموجي للأشعة السينية» له هدفان ممكنان على التمثيل البياني نفسه. أقل (أقصر) طول موجى (λ_{min}) يخصّ الطيف كله ويتغير عند تغيير فرق جهد الأنبوبة (أنبوبة كولدج)؛ أما الأطوال الموجية المميزة فتخصّ معدن الهدف ولا تتغير بتغير فرق جهد الأنبوبة . وقراءة قمة حين كان المطلوب حدّ القطع هي أشيع خطأ هنا.

نقطة

! تُسمى القيمة المطلقة للشحنة التي يحملها إلكترون واحد الشحنةَ الأولية، ويُرمَزلها بالرمز e

- **الاشعة السينية هى موجات كهرومغناطسية،** أطولها الموجية أقصر من الاشعة فوق البنفسجية

! يُبيِّن التمثيل البياني لشدة الأشعة السينية مقابل طولها الموجي، المتحصَّل عن طريق تصادم معدن بإلكترونات معجَّلة بفرق جهد عالية، تخطيطيًا في الشكل أعلاه. ويُسمى الجزء الناعم من المنحنى الأشعةَ السينية المتصلة، وتُسمى الأجزاء التي تبرز فيها الشدة الأشعةَ السينية المميَّزة.



وتُحدَّد أطوال موجات الأشعة السينية المميَّزة بنوع المعدن الذي تصطدم به الإلكترونات. (وكلما صغر الطول الموجي كبرت الطاقة.) وعندما تتحول طاقة إلكترون كلها إلى طاقة فوتون من الاشعة السينية واحد، تصبح طاقة فوتون الاشعة السينية أكبر مايمكن، ويصبح الطول الموجي أقصر ما يكون.

! طاقة الفوتون الواحد E [J] تتناسب مع تردد الضوء $E = h\gamma$: γ (Hz)

(حيث h: ثابت بلانك) — وبالتعويض $\gamma = \frac{c}{\lambda}$ ، $E = \frac{hc}{\lambda}$

وكمية تحرك الفوتون الواحد (kg.m/s) p تتناسب عكسيًا مع الطول الموجي للضوء λ—

$\frac{h}{p} = \lambda$ وبالتعويض عن $\frac{c}{v} = \lambda$ نحصل على $\frac{h\,v}{c} = \lambda$. واتجاه كمية التحرك هو اتجاه سير الفوتون نفسه.

! بما أن طاقة إلكترون واحد أو فوتون واحد صغيرة للغاية، يُستخدَم أحيانًا الإلكترون فولت (رمزه eV) وحدةً للطاقة إلى جانب الجول (رمزه J). و V1e يساوي الطاقة التي يكتسبها إلكترون شحنته e [C] عند تعجيله بفرق جهد 1V

$$1\ \text{eV} = 1.6\times10^{-19}\ \text{J} = \text{e}\ (\text{J})$$

كما يُسمى 10^6 eV ميجا إلكترون فولت (رمزه MeV).

صندوق المعادلات:

طاقة الفوتون:	(h = ثابت بلانك؛ الوحدة: J) $E = hv = \frac{hc}{\lambda}$
كمية تحرك الفوتون:	(الوحدة: kg·m/s، فى اتجاه سير الفوتون) $p = \frac{hv}{c}$
أقصر طول موجي λ_0:	$eV = \frac{h\,v}{\lambda_0}$ $\Rightarrow$ $\lambda_0 = \frac{h\,v}{c}$ $\Rightarrow$ (طاقة الإلكترون كلها ⇨ فوتون واحد)
الإلكترون فولت	$1\ \text{eV} = 1.6\times10^{-19}\ \text{J} = \text{e}\ (\text{J})$ (الطاقة المكتسَبة لشحنة e خلال V1) $10^6\ \text{eV} = 1\text{MeV}$ (واحد ميجا الكنرون فولت)

ملاحظة عملية:

تصف العلاقة الحالةَ التي ينقل فيها إلكترون كل شيء لفوتون واحد، وهو ما لا يكاد يحدث: فمعظم الإلكترونات تنتج عدة فوتونات ضعيفة أو تسخّن الهدف فحسب، فأنبوبة الأشعة السينية محوّل رديء ولا بد من تبريد الأنود (المصعد). فالعلاقة تتنبّأ إذن بحافة لا بارتفاع الطيف ولا شكله، ولا تذكر شيئًا على الإطلاق عن مكان وقوع الخطوط المميز — فتلك تأتي من المستويات الداخلية لذرة الهدف.

مثال محلول:

الموقف:	أوجد ما يلي لأقرب رقمين عشريين. خذ ثابت بلانك $6.6\ J\cdot s \times 10^{-34}$، وسرعة الضوء $3.0\ m/s \times 10^{8}$، والشحنة الأولية $1.6\ C \times 10^{-19}$. (أ) إلكترونات معجَّلة بفرق جهد $2.2\ V \times 10^{4}$ تصطدم بمعدن. أوجد أقصر طول موجي، بالمتر، للأشعة السينية المتولّدة. (ب) فوتون من الاشعة السينية طوله الموجي $1.5\ m \times 10^{-10}$ يسير في الاتجاه الموجب لمحور x. أوجد اتجاه ومقدار كمية تحركه، بـ kg·m/s.
المعطيات والمطلوب:	(أ) $1.6 \times 10^{-19} = e$، $3.0\ m/s \times 10^{8} = c$، $6.6\ J\cdot s \times 10^{-34} = h$ ، $2.2 \times 10^{4} = V$ ؛ أوجد أقصر طول موجي λ_0. (ب) $1.5\ m \times 10^{-10} = \lambda$ بمحاذاة +x؛ أوجد اتجاه p ومقداره.
التمثيل:	يحدث أقصر طول موجي عندما تتحول طاقة إلكترون واحد كلها إلى طاقة فوتون واحد. والإلكترون المعجَّل خلال V يكتسب طاقة حركية eV (من طاقة الوضع $U = qV$ مع $q = e$)، وهي تساوي طاقة الفوتون العظمى $\lambda_0 / c\ h$. وفي (b)، تشير كمية تحرك الفوتون بمحاذاة اتجاه سيره.
الاستراتيجية:	طاقة الإلكترون = طاقة الفوتون، $\lambda_0 / hc = eV$، وحُلّ لإيجاد $\lambda_0 = eV / hc$). ولكمية التحرك، استخدم $\lambda / p = h$ مباشرة، واحتفظ باتجاه السير.
الحل الموضح:	(أ) عندما تصير طاقة الإلكترون كلها طاقة فوتون واحد، يكون الطول الموجي أقصر ما يكون. وطاقة الإلكترون ،[J] eV فمع أقصر طول موجي λ_0، وبما أن $eV = hc/\lambda_0$، فإن $\lambda_0 = hc/(eV)$. $\lambda_0 = (6.6\times10^{-34})(3.0\times10^{8}) / [(1.6\times10^{-19})(2.2\times10^{4})] =$ $(1.98\times10^{-25})/(3.52\times10^{-15}) = 5.625\times10^{-11} = 5.6\ m \times10^{-11}$. (ب) بجعل كمية التحرك kg·m/s] p]: $p = \lambda / h = (6.6\times10^{-34})/(1.5\times10^{-10}) = 4.4\times10^{-24}$، إذن $4.4\ kg\cdot m/s \times 10^{-24}$ في الاتجاه الموجب لمحور x.
منطقية الحل:	(أ) بالتعويض عكسيًا، $hc/\lambda_0 = (1.98\times10^{-25})/(5.625\times10^{-11}) = 3.52\times10^{-15}\ J$، و $eV = (1.6\times10^{-19})(2.2\times10^{4}) = 3.52\times10^{-15}\ J$ — فالطاقتان متطابقتان. (ب) الطول الموجي الأقصر كان سيعطي كمية تحرك أكبر؛ و $1.5\times10^{-10}\ m$ طول موجي سيني نمطي ويعطي كمية تحرك صغيرة من رتبة 10^{-24} kg·m/s، كما هو متوقَّع لفوتون واحد.
فسِّرها بنفسك:	في جملة واحدة، فسِّر لماذا تجعل زيادةُ فرق جهد التعجيل V أقصرَ طول موجي λ_0 أصغر.

حاول بنفسك: فوتون أشعة سينية طوله 3.0×10^{-11} m. أوجد طاقته من $E = hc/\lambda$

حاول:

(أ) أوجد ما يلي لأقرب رقمين عشريين. خذ ثابت بلانك 6.6×10^{-34} J·s، وسرعة الضوء 3.0×10^{8} m/s، والشحنة الأولية 1.6×10^{-19} C. إلكترونات معجَّلة بفرق جهد 5.0×10^{4} V تصطدم بمعدن. أوجد أقصر طول موجي، بالمتر، للأشعة السينية المتولّدة.

(ب) فوتون أشعة سينية طوله 6.0×10^{-10} m ويتحرك في الاتجاه السالب لمحور x

(i) أوجد طاقته (J).

(ii) أوجد اتجاه ومقدار كمية تحركه بـ kg·m/s..

شكل 5–2–3• أثناء تصوير الصدر بالأشعة السينية، يوجّه أنبوب علوي شعاعًا مخروطيًا من بقعته البؤرية الصغيرة عبر صدر المريض إلى كاشف مسطح، بينما يعمل فنيّ الأشعة خلف حاجز واقٍ؛ وتُظهر الشاشة العظمَ الكثيف أبيض ساطعًا مقابل حقول رئوية أغمق نافذة للأشعة.

في سياق جديد:

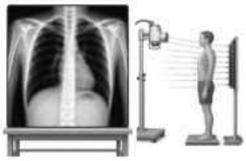
تستخدم صورة الصدر السينية لمريض هذه الفيزياء بعينها. فالجهاز يعجّل إلكترونات خلال فرق جهد أنبوبة مختارة؛ وفرق الجهد الأعلى تنتج أشعة سينية أقصر طولًا موجيًا وبالتالي أعلى طاقةً للفوتون، فتنفذ خلال النسيج أقوى. ويختار فنيّو الأشعة الفرق جهد لتناسب جزء الجسم: فرق جهد أدنى لليد، وأعلى للصدر، حتى تعبر فوتونات كافية لتكوين صورة واضحة على الكاشف دون استخدام طاقة أكثر من اللازم.

دورك الآن: ضُبطت أنبوبة على جهد 4.0×10^{4} V. باستخدام $\lambda_0 = hc/(eV)$، قدّر أقصر طول موجي لأشعته السينية.

طبيعة العلم:

في عام ١٦٣٢، تخيّل جاليليو مقصورة أسفل سطح سفينة تُبحر بهدوء: ماء يتساقط، وأسماك في وعاء، وفراشات تحوم. فلا توجد أي ملاحظة داخل المقصورة تكشف ما إذا كانت السفينة ساكنة أم تتحرك بسرعة منتظمة. فما يقيسه المراقب يعتمد على حركة المراقب نفسه — هو نفس الدرس المستفاد من المطر المتساقط على نافذة الأتوبيس (الحافلة). ولا تكون السرعة ذات معنى إلا عندما يتم تحديد الإطار المرجعي

دورك الآن: اقترح كيف يمكن لمراقبَين دقيقين أن يسجّلا سرعتين مختلفتين لنفس قطرة المطر دون أن يكون أيّ منهما مخطئًا.



شكل 5–2–4• تنفذ الأشعة السينية من المصدر خلال النسيج الرخو لكن يوقفها العظم الكثيف، فتُطبَع العظام ظلالًا بيضاء ساطعة على الكاشف.

من الأصل — كيف ترى الأشعة السينية خلال الجسم. الأشعة السينية موجات كهرومغناطيسية قصيرة الطول الموجي جدًا وذات قدرة قوية على النفاذ خلال المادة (القدرة النافذة). ومع ذلك لا تنفذ بسهولة خلال المواد عالية الكثافة التي تحتوي كثيرًا من الكالسيوم، كالعظام، فلا تظهر على الفيلم الفوتوغرافي أو الحسّاس إلا أجزاء العظام ظلالًا بيضاء، مما يتيح رؤية داخل الجسم.

ويتقدّم العلم حين تُربَط كمية لا يمكن رؤيتها — هنا طاقة الفوتون التي تحملها أشعة سينية — بمعادلة واحدة، $E = hc/\lambda$، بشيء قابل للقياس، وهو الطول الموجي. ونموذج الفوتون نفسه الذي يحدد أقصر طول موجي في أنبوب يتنبّأ أيضًا بعمق نفاذ الإشعاع في النسيج، فيتيح للمهندسين تصميم صورة طبية آمنة ونافعة من المبادئ الأولى.

وقد عثر رونتغن على هذه الأشعة مصادفةً في نوفمبر 1895 وهو يعمل بأنابيب التفريغ، وجلب الاكتشاف أول جائزة نوبل في الفيزياء عام 1901. وربط ديوان وهنت لاحقًا حافةَ الطول الموجي القصير بفرق جهد الأنبوب — وهي العلاقة المستخدَمة هنا بعينها. فالمصادفة لا تصير اكتشافًا إلا حين يتتبّعها أحد بعناية.

دورك الآن: اقترح قياسًا واحدًا على طيف الشدة–الطول الموجي يتيح لك تحديد أي معدن استُخدِم هدفًا.

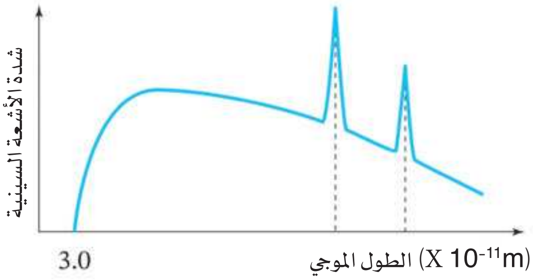
سؤال الدرس، وإجابته:

في أنبوبة، لا في الطبيعة. تُسحَب الإلكترونات خلال فرق جهد كبير وتصطدم بهدف معدني، حيث تتحول طاقتها الحركية إلى إشعاع عبر مسارين: انحرافُ الإلكترونات يعطي طيف متصلة، وانتقال الإلكترونات الداخلية من ذرات الهدف تعطي خطوطًا مميِّزة حادة. ويحدد فرق جهد التعجيل كمية الطاقة التي يحملها كل إلكترون نحو أقصى مدى يبلغه الطيف من جهة الطول الموجي القصير، عند $\lambda_0 = hc/(eV)$؛ ويحدد اختيار الهدف مواضع الخطوط الطيفية المميزة الحادة. ولأن الحزم الناتجة أعلى طاقة بكثير من حزم الضوء، فإنها تتسلل عبر الأنسجة الرخوة وتتوقف عند العظام — وهذا ما يرسم الصورة.

تمرين:

(أ) أوجد ما يلي لأقرب رقمين عشريين. بافتراض $h = 6.6\times10^{-34}$ J·s، و $c = 3.0\times10^{8}$ m/s، و $e = 1.6\times10^{-19}$ C.، إلكترونات معجَّلة بفرق جهد 3.0×10^{4} V تصطدم بمعدن. أوجد أقصر طول موجي، بالمتر، للأشعة السينية المتولّدة.

(ب) يُبيِّن طيف الشدة–الطول الموجي للأشعة السينية المتولّدة بقذف معدن بإلكترونات معجَّلة في الشكل؛ ويقع حدّ قطعه الحادّ عند الطول الموجي القصير عند. 3.0×10^{-11} m. أوجد فرق جهد التعجيل V، بالفولت، المستخدَمة لتوليد هذه الأشعة السينية.



شكل 5–2–5 • تمرين 2: طيف الشدة–الطول الموجي للأشعة السينية، أقل طول موجي عند 3.0×10^{-11} m وقمتين مميِّزتين.

(جـ) تُعجَّل إلكترونات بفرق جهد 1.0×10^{5} V وتصطدم بمعدن.

(i) أوجد طاقة الإلكترونات المعجَّلة بالجول.

(ii) أوجد أقصر طول موجي، بالمتر، للأشعة السينية المتولّدة.

(iii) أوجد كمية تحرك، بـ kg·m/s، الفوتونات السينية ذات ذلك الطول الموجي الأقصر.

الدرس ٥-٣ — موجات المادة

؟ سؤال الدرس:

تمامًا كما يسلك الضوء سلوك جسيم وموجة معًا، هل يستطيع جسيم كالإلكترون أن يسلك سلوك موجة أيضًا؟

ستتعلم

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. تشرح ما معنى أن يكون لجسم ذي كتلة طول موجي أصلًا، وتسمّية تلك الموجة الخاصة في حالة الإلكترون.

٢. تستخرج منها قيمة عددية: تحوّل كتلة وسرعة معينين إلى طول موجي، و مقارنة النتيجة بحجم الذرة.

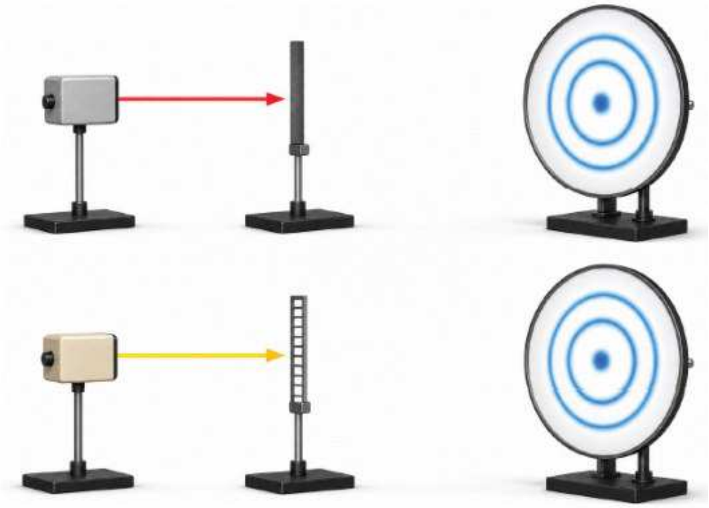
٣. تستدل من ذلك الرقم على سبب قدرة المجهر الإلكتروني على تمييز تفاصيل لا يستطيع المجهر الضوئي الوصول إليها..

فكرة أساسية:

موجة المادة — مقايضة الموجة والجسيم تجري في الاتجاهين: فما ظُنّ موجةً محضة تبيّن أنه يحمل كمية تحرك، وما ظُنّ جسيمًا محضًا تبيّن أن له طولًا موجيًا..

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر

أرسل حزمة ضيقة من إلكترونات سريعة خلال صفيحة رقيقة من الجرافيت ودعها تسقط على شاشة. قد تتوقع بقعة ساطعة واحدة حيث تتكدّس الجسيمات. لكن الشاشة تُظهر بدلًا من ذلك مجموعة حلقات ساطعة متحدة المركز، وهي بالضبط نوع النمط الذي يصنعه الضوء حين يمر خلال محزوز دقيق. فتيار «الجسيمات» قد انتشر وتداخل كموجة.



شكل 5-3-1 • حزمة إلكترونية خلال غشاء جرافيت تصنع حلقات الحيود المتحدة المركز نفسها التي يصنعها الضوء خلال محزوز — فالحزمة الإلكترونية تسير كموجة.

تنبأ:

(أ) إذا جُعِلت الإلكترونات في الحزمة تتحرك أسرع، فتكبر كمية تحركها p، فهل تتوقع أن تتباعد الحلقات أكثر أم تتقارب؟

(ب) هل تُظهر حزمة من جسيمات أثقل بكثير تتحرك بنفس السرعة نمط حلقات أوسع أم أضيق؟

استكشف — قدّر طول موجة الإلكترون من حلقاته

ما ستفعله: ما ستفعله: ترسل حزمة إلكترونية خلال غشاء جرافيت عند عدة فروق جهد تعجيل وتقيس كيف يتغيّر حجم حلقة الحيود مع نمو كمية تحرك الإلكترونات.

الزمن: 15 دقيقة

ما تحتاجه:

- أنبوبة حيود إلكتروني
- مصدر تيار مستمر عالي الفرق جهد
- فولتميتر
- مسطرة

مسطرة

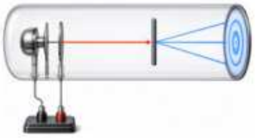
فولتيمتر

مصدر طاقة عالي الجهد

انبوبة الحيود

الخطوات:

1. اضبط مصدر الطاقة عالي الجهد على فرق جهد تعجيل معلوم V واقرأه على الفولتميتر. وكلما أسرعت الإلكترونات كبرت كمية تحركها $p = mv$..
2. بالمسطرة، قِس قطر D لحلقة ساطعة مختارة على الشاشة.
3. ارفع V على خطوات، وسجّل للحلقة نفسها V وقطرها D في كل مرة.
4. احسب لكل محاولة $D \times \sqrt{V}$ وأدخله في العمود الأخير.


شكل 5-3-2• أنبوب حيود إلكتروني: يطلق المدفع إلكترونات خلال فرق جهد التعجيل V إلى هدف جرافيت؛ ويُقاس نصف قطر الحلقة على الشاشة

المحاولة	الجهد V بوحدة kV –	قطر الحلقة D بوحدة cm	حاصل $D \times \sqrt{V}$ بوحدة $cm \times \sqrt{kV}$
١.			
٢.			
٣.			

ملاحظة عملية: أظلِم الغرفة، وقِس في كل مرة الحلقة الساطعة نفسها عبر مركزها من الحافة الداخلية إلى الحافة الداخلية؛ وثِق بالاتجاه العام عبر التشغيلات أكثر من أي قراءة مفردة.

حلّل ما جمعته:

(أ) مع ارتفاع فرق جهد التعجيل V، ماذا يحدث لقطر الحلقة D؟ وانظر نزولًا في العمود الأخير — ماذا تلاحظ على الجداء $D \times \sqrt{V}$؟

(ب) قطر الحلقة D ينمو مع الطول الموجي λ، والـ V الأكبر يعطي كمية تحرك p أكبر. ومن ثبات $D \times \sqrt{V}$ تقريبًا، احتجّ على كيفية اعتماد λ على p، وتنبّأ بالحلقات التي ستصنعها حزمة إلكترونية أبطأ بكثير؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

الجسيم المتحرك يحمل موجة

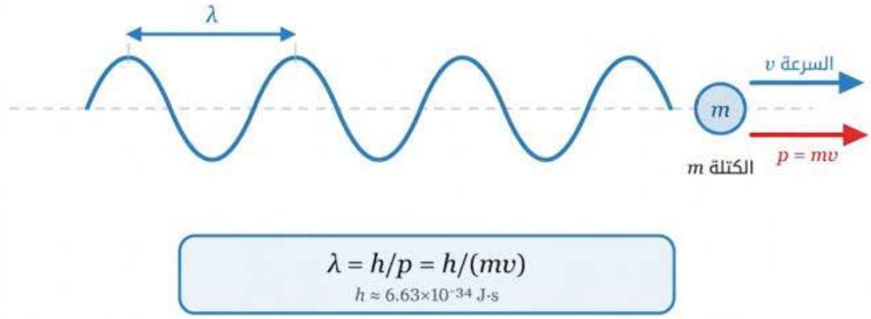
كان التبرير الذي أدى إلى ظهور هذه الفكرة هو مبدأ التناظر. فقد ظل الضوء يُنظر إليه لمدة قرن على أنه موجة، ثم، في التأثير الكهروضوئي وفي تشتت الأشعة السينية، على السلوك كشيء يحمل كمية تحرك

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

وسأل دي برولي: لماذا تستخدم الطبيعة تلك العلاقة في اتجاه واحد فقط؟ وقرأها معكوسة: بمعلومية شيء ذي كمية تحرك معينة، حُلّ المعادلة نفسها لإيجاد λ. ولا شيء في تلك الخطوة دليل — إنه تخمين، لكنه تخمين دقيق قابل للاختبار. فإن كانت حزمة من الإلكترونات تحمل حقًّا طولًا موجيًا بحجم الذرّة، فإن توجيهها نحو بلورة، تصادف أن تكون المسافات بين مستويات ذراتها تقريبًا بنفس الحجم، لا بد أن ينتج عنه نمط الحلقات الذي ينتجه محزوز حيود مع الضوء. وحلقات الشكل 1-3-5 هي دليل على نجاح هذا الاختبار.

الطول الموجي تحدده كمية التحرك:

اقرأ الصيغة كقاعدةً تتعلق بمقامها. فكل ما يجعل الشيء أصعب انحرافًا — كتلة أكبر، سرعة أكبر — يقع تحت ثابت بلانك، فكل زيادة كهذه تُقلّل (تقلص) الناتج؛ ولأن الثابت في الأعلى نفسه من رتبة 10^{-34}، فحتى المقام الصغير جدًا يترك نتيجة صغيرة جدًا. وتلك الحقيقة وحدها تحدد أين يمكن ملاحظة التأثير على الإطلاق.. فللحصول على طول موجي كبير بما يكفي للحيود، يجب أن تكون كمية التحرك ضئيلة، وهو ما يعني عمليًا شيئًا خفيفًا كالإلكترون مدفوعًا بفروق جهد صغيرة لا أكثر. وزيادة فرق جهد التعجيل في الاستكشاف (التجربة) يفعل العكس: يزيد كمية التحرك، ويقلّل الطول الموجي، ويسحب الحلقات إلى الداخل — وهو بالضبط سبب ثبات حاصل الضرب في العمود الأخير.



شكل 5-3-3 • الوصفان مرسومين معًا: كتلة m تسير بسرعة v، والموجة التي تجري على المسار نفسه، ويثبّت تباعدَ قممها كميةُ التحرك

الخلاصة

! للجسيمات خواص موجية. ويُسمى هذا موجةً مادية. وعلى وجه الخصوص، عندما يكون الجسيم إلكترونًا تُسمى الموجة موجةً إلكترونية. ولتكن كمية تحرك الجسيم p [kg·m/s]، وكتلة الجسيم m [kg]، والسرعة v [m/s]، فإن الطول الموجي λ [m] لموجة المادة يُعبَّر عنه بـ:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mV}$$

صندوق المعادلات:

طول موجة المادة:	$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mV}$ (h: ثابت بلانك)
كمية التحرك: $p = mV$ (الوحدة: kg·m/s)	
الثوابت: $h \approx 6.63\times10^{-34}$ J·s؛ **كتلة الإلكترون** $m = 9.1\times10^{-31}$ kg	

حقيقة أساسية:

المقياس — إلكترون المثال المحلول يخرج عند نحو 7×10^{-11} m، أي تقريبًا عرض ذرة؛ أما كرة تنس مقذوفة فتخرج قرب 10^{-34} m، أدنى بكثير من أي طول قابل للقياس أو يمكن لشيء أن يحيد حوله. وكلا الجوابين من الصيغة نفسها. فالسلوك الموجي ليس نادرًا ولا غريبًا — بل كوني، ولأي شيء أثقل من ذرة هو غير مرئي بالمرة.

ملاحظة:

انتبه — اعمل بالوحدات الدولية طوال الوقت: فكتلة تُدسّ بالغرام، أو سرعة بـ km/s، تزحزح الجواب أُسسًا عشرية كاملة، وعند هذا المقياس يكون الأسّ العشري هو الجواب. واقسم على كمية التحرك، لا على السرعة وحدها.

مثال محلول:

الموقف:	أوجد طول موجة إلكترون سرعته 1.0×10^{7} m/s، بافتراض $h = 6.6 \times 10^{-34}$ J·s وكتلة الإلكترون 9.1×10^{-31} kg.
المعطيات والمطلوب:	$v = 1.0 \times 10^{7}$ m/s، $m = 9.1 \times 10^{-31}$ kg، و $h = 6.6 \times 10^{-34}$ J·s؛ والمطلوب λ.
التمثيل:	يحمل الإلكترون موجة مادة يثبّت طولَها الموجي كميةُ تحركه $p = mv$.
الاستراتيجية:	احسب أولًا $p = mv$ من الكتلة والسرعة، ثم عوض في $\lambda = h/p$
الحل الموضح:	**كمية التحرك p:** $p = (9.1 \times 10^{-31}) \times (1.0 \times 10^{7}) = 9.1 \times 10^{-24}$ kg·m /s. والطول الموجي: $\lambda = 6.6 \times 10^{-34} \div 9.1 \times 10^{-24} \approx 7.3 \times 10^{-11}$ m
منطقية الحل:	الطول الموجي في حدود 10^{-10} m، أي قريب من حجم الذرة وأقصر كثيرًا من الضوء المرئي، نحو 5×10^{-7} m. وهذا الطول الصغير هو ما يتيح لحزمة الإلكترونات تمييز تفاصيل ذرية.
فسِّرها بنفسك:	في جملة واحدة، قل لماذا يجعل تسريعُ الإلكترون طولَ موجته المادية أقصر.

جرِّب بنفسك: أوجد طول موجة جسم كتلته 0.10 kg وسرعته 30 m/s، حيث $h = 6.6 \times 10^{-34}$ J·s.

حاول:

أوجد لأقرب رقمين عشريين طول موجة إلكترون سرعته 2.0×10^{6} m/s، حيث $h = 6.6 \times 10^{-34}$ J·s و $m = 9.1 \times 10^{-31}$ kg.

في سياق جديد

يوظّف المجهر الإلكتروني موجةَ المادة. فلأن الموجة الإلكترونية يمكن أن يُعطى لها طول موجي أقصر آلاف المرات من طول موجة الضوء المرئي، فإن جهازًا يركّز موجات إلكترونية بدل أشعة الضوء يستطيع تصوير أجسام صغيرة للغاية بوضوح — كالفيروسات وتراكيب الأسطح الدقيقة التي لا يستطيع مجهر ضوئي عادي تمييزها أبدًا. وكلما قصر الطول الموجي أمكن رؤية التفاصيل بدقة.

دورك الآن: قارن موجة المثال $\lambda \approx 7.3 \times 10^{-11}$ m بالضوء الأخضر $\lambda \approx 5 \times 10^{-7}$ m. كم مرة تقريبًا تكون موجة الإلكترون أقصر؟ ولماذا يتيح ذلك للمجهر الإلكتروني تفاصيل أدق؟

طبيعة العلم:

من الأصل — تحويل فكرة غريبة إلى أداة عملية. الادّعاء بأن الجسيم موجة أيضًا يبدو مفارقة، لكنه قُبل بعد اختباره؛ فقد حيّدت حزم الإلكترونات وأنتجت حلقات موجية، ووافقت أطوالها المقاسة $\lambda = \frac{h}{p}$. وما إن نجت العلاقة من ذلك الاختبار حتى لم تُترَك طُرفة — بل صارت مبدأ عمل المجهر الإلكتروني، وهو جهاز لا يعمل إلا إذا كانت الإلكترونات تسلك حقًّا سلوك موجات قصيرة الطول الموجي. فالنموذج يكسب الثقة حين يؤكّد القياسُ تنبؤَه المفاجئ ثم يؤدي عملًا موثوقًا.

وقد اقترح دي برولي هذا في أطروحته عام 1924 دون تجربة وراءه، على التناظر وحده؛ ثم حاد ديفيسون وجيرمر، وج. ب. طومسون، الإلكتروناتِ عام 1927 فحوّلوا الحدس فيزياءً. فالفرضية الجريئة مرحَّب بها في العلم، لكنها لا تكسب مكانها إلا حين يوافقها قياس.

دورك الآن: اقترح ملاحظة واحدة يمكن لمجرِّب إجراؤها بأنبوبة حيود إلكتروني لاختبار التنبؤ بأن حزمة إلكترونية أسرع لها طول موجي أقصر.

سؤال الدرس، وإجابته:

نعم، والدليل صورة فوتوغرافية. فالإلكترونات المقذوفة إلى غشاء جرافيت تسقط في حلقات متحدة المركز، وهو ما لا يستطيعه إلا شيء ينتشر ويتداخل؛ أما تيار من كرات صلبة صغيرة فكان سيصنع بقعة واحدة. وتوافق أحجامُ الحلقات الطولَ الموجي المتنبَّأ به من كمية تحرك الإلكترونات، وتتقلّص عند رفع فرق جهد التعجيل، تمامًا كما هو متوقَّع. وسبب بقاء الأثر خفيًّا في الحياة اليومية حسابي لا مبدئي: اقسم ثابت بلانك على كمية تحرك أي شيء تستطيع حمله يكن الناتج أصغر من أي جسم يمكن أن ينثني حوله. والطول الموجي القصير نفسه الذي يجعل الأثر غير مرئي لكرة تنس هو ما يجعل المجهر الإلكتروني ممكنًا.

تمرين:

عتبر إلكترونًا كتلته m وشحنته ‎-e‏ معجَّلًا من السكون خلال فرق جهد V. افترض أن ثابت بلانك h.

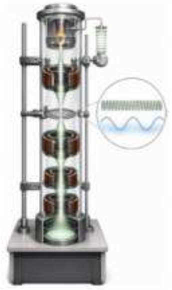
(i) أوجد كمية تحرك الإلكترون المعجَّل.

(ii) أوجد الطول الموجي للموجة الإلكترونية.

شكل 5-3-4 • مجهر إلكتروني نافذ يرسل حزمة إلكترونية دقيقة نزولًا في عمود مفرَّغ، تركّزها ملفات عدسات مغناطيسية حلقية على عيّنة ضئيلة، منتجةً صورة رمادية عالية التكبير لفيروس مميَّزًا إلى ما وراء متناول أي مجهر ضوئي.

⭐ مصطلح:

المجهر الإلكتروني — جهاز يستخدم موجات إلكترونية، طولها الموجي أقصر بكثير من طول موجة الضوء، لتصوير أجسام صغيرة للغاية بوضوح.



شكل 5-3-5 • عمود مجهر إلكتروني يركّز الحزمة الإلكترونية بعدسات مغناطيسية على العيّنة؛ ويقارن الإطار المُدرَج الطول الموجي الإلكتروني القصير جدًا (الأخضر) بالطول الموجي الأطول كثيرًا للضوء (الأزرق) — ولهذا تميّز الحزمة الإلكترونية تفاصيل دقيقة يعجز عنها الضوء.

المؤلفون

Maki Komizo
Yukihiro Kawakubo
Tomoaki Tsunoyama
Yoko Sasamori
Yuki Toda
Ritsu Igarashi
Yasser Mahdy
Kotomi Shirai (Designer)

المراجعون

أ.د. هاني نظمي سليمان
أ.د. هند علي محمد علي
أ.د. إسلام محمد شيحة
أ.د. وليد محمد أحمد دسوقى
د. عزيزة رجب خليفة
د. حنان أبو العباس محمد
أ. أيمن شوقي السيد
أ. سعيد محمد على
أ. نورة محمد عبد المجيد

الإشراف العام

د. جبريل أنور حميدة
رئيس الادارة المركزية لتطوير المناهج

EDUCATION SPRINGS NEW LIFE

موقع الدكتور
محمد رزق
التعليمي

Mostte
Tesss

امسح الباركود بالموبيل لتثبيت
التطبيق وتحميل كل الملازم مجانا وبسرعه

MR

حمل التطبيق الأن

GET IT ON
Google Play

ملازم ابتدائي
ملازم اعدادي
ملازم ثانـــوي
كورسات ونتائج امتحانات

موقع الدكتور محمد رزق
Dr.Mo.RizK